

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
Francis LAJOIE

IMPACTS DES BARRAGES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS
(ANNUELS ET MENSUELS) ET COMPARAISON AVEC LES NORMES DE
DÉBITS RÉSERVÉS ÉCOLOGIQUES. INFLUENCE DU MODE DE GESTION
ET DE LA TAILLE DES BASSINS VERSANTS

NOVEMBRE 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Ali ARKAMOSE ASSANI, mon directeur de recherche pour la supervision constante de mon projet de recherche et M. Mhamed MESFIOUI, mon codirecteur pour son support technique tout au long du projet. J'aimerais également remercier les organismes subventionnaires, CRSNG et FIR qui ont permis la réalisation des travaux par leur contribution financière. Je porte une attention spéciale à ma conjointe Mme Marie-Claude Chabot ainsi qu'à tous les membres de ma famille pour leur encouragement tout au long de mon cheminement. Mes remerciements s'adressent aussi à M. Stéphane CAMPEAU et M. Alain CHALIFOUR d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Finalement, je remercie toutes les personnes qui sont de près ou de loin concernées dans la réalisation des articles.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTE DES FIGURES	9
CHAPITRE 1	11
RÉSUMÉ DU MÉMOIRE	12
1.1. INTRODUCTION	12
1.2. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES IMPACTS HYDROLOGIQUES DES BARRAGES	12
1.3. PROBLÉMATIQUE DU PROJET DE RECHERCHE	14
1.4. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	17
1.4.1 Hypothèses relatives aux débits moyens annuels	17
1.4.2 Hypothèses relatives aux débits moyens mensuels	18
1.4.3 Hypothèse relative à la comparaison des débits lâchés en aval des barrages et les normes de débits réservés	18
1.5. MÉTHODOLOGIE	18
1.5.1 Sources des données et choix des stations	18
1.5.2 Caractérisation des débits annuels et mensuels et méthode d'analyse des données	20
1.5.3 Comparaison entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages	23
1.6. RÉSULTATS ET CONCLUSIONS	26
1.6.1 Les caractéristiques des débits moyens annuels	26
1.6.2 Les caractéristiques des débits moyens mensuels	27
1.6.3 Comparaison des débits lâchés en aval des barrages avec les normes des débits réservés	28
BIBLIOGRAPHIE	32
CHAPITRE 2	35

IMPACTS DES BARRAGES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MOYENS ANNUELS EN FONCTION DU MODE DE GESTION ET DE LA TAILLE DES BASSINS VERSANTS AU QUÉBEC. 36

RÉSUMÉ 37

2.1. INTRODUCTION 41

2.2. MÉTHODOLOGIE 43

2.2.1. Sources des données 43

2.2.2. Justification de la méthode d'analyse des données 45

2.3. RÉSULTATS 51

2.3.1. Impacts des barrages sur le volume d'écoulement et la fréquence des débits moyens annuels 51

2.3.2. Impacts des barrages sur la variabilité inter-annuelle des débits 54

2.3.3. Impacts des barrages sur la forme de la courbe de distribution des débits moyens annuels 55

2.4. DISCUSSION ET CONCLUSION 56

BIBLIOGRAPHIE 65

CHAPITRE 3 86

IMPACTS OF DAMS ON MONTHLY FLOW CHARACTERISTICS. THE INFLUENCE OF WATERSHED SIZE. 87

SUMMARY 88

3.1 INTRODUCTION 89

3.2 STATIONS AND DATA ANALYSIS METHOD 91

3.3 CHARACTERIZATION OF MONTHLY AVERAGE FLOWS 92

3.4 RESULTS 94

3.4.1 *Impacts of the dams on the periods of occurrence of the monthly maximum and minimum flows and their interannual variability* 94

3.4.2 *Impacts of dams on magnitude and frequency* 95

3.4.3 *Impacts of dams on interannual variability of magnitude* 96

3.4.4 *Impacts of dams on the shape of the distribution curves* 97

3.5 DISCUSSION AND CONCLUSION 98

BIBLIOGRAPHY 101

CHAPITRE 4

114

COMPARAISON ENTRE LES DÉBITS RÉSERVÉS ÉCOLOGIQUES ET LES DÉBITS LÂCHÉS EN AVAL DES BARRAGES AU QUÉBEC. INFLUENCE DU MODE DE GESTION DES BARRAGES, DE LA TAILLE DES BASSINS VERSANTS ET DE LA SAISON.	115
Résumé	116
4.1. Introduction	118
4.2. Méthodologie	120
4.2.1. Sources des données de débits en aval des barrages	120
4.2.2. Estimation des débits réservés écologiques en aval des barrages	121
4.2.3. Méthodes de comparaison des débits réservés écologiques et les débits mesurés en aval des barrages	123
4.2.4. Méthodes d'analyse des données	124
4.3. Résultats	124
4.3.1. Influence de la taille des bassins versants	124
4.3.2. Influence de la saison et du régime hydrologique (mode de gestion) des barrages	125
4.4. Discussion et Conclusion	127
Bibliographie	130

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

Tableau 1.1. Les cinq caractéristiques des débits et leurs rôles écologiques (adapté de RICHTER et al., 1996).....	21
Tableau 1.2. Les 6 indices pour estimer les débits réservés écologiques au Québec (BELZILE et al., 1997).....	24
Tableau 1.3. Modifications des caractéristiques des débits moyens annuels.....	26
Tableau 1.4. Modifications des caractéristiques des débits moyens mensuels associés au régime d’Inversion en fonction des mois.....	27
Tableau 1.5. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les fréquences au non dépassement des débits réservés en aval des barrages. Résultats de l’analyse de variance.....	29
Tableau 1.6. Comparaison des fréquences moyennes en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.....	30
Tableau 1.7. Comparaison des moyennes des écarts de magnitude en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.....	30

CHAPITRE 2

Tableau 2.1. Les caractéristiques et les variables statistiques des débits moyens annuels.....	69
Tableau 2.2. Comparaison des paramètres de régression. Résultats de l’analyse de variance (test de parallélisme).....	70
Tableau 2.3. Comparaison d’impacts de barrages en fonction de leurs modes de gestion aux échelles annuelles, mensuelles et journalières au Québec.....	71
Tableau 2.4. Comparaison d’impacts des barrages en fonction de la taille des bassins versants au Québec. Cas du régime d’Inversion.....	72

Tableau 2.5. Les cinq caractéristiques fondamentales et leurs rôles écologiques (RICHTER et al., 1996).....	73
---	----

CHAPITRE 3

Table 3.1. List of stations directly influenced by Reservoirs in Québec.....	103
Table 3.2. Comparison test of regression line parameters adjusted over the monthly average flows values of natural rivers and regulated rivers.....	104
Table 3.3. Comparison test of regression line parameters adjusted over P_{90} flow values of natural rivers and regulated rivers.....	104
Table 3.4. Comparison test of regression line parameters adjusted over P_{10} flows values of natural rivers and regulated rivers.....	104
Table 3.5. Summary of change of monthly flow characteristics in Québec.....	105

CHAPITRE 4

Tableau 4.1a. Les stations analysées. Régime régularisé d'Inversion.....	135
Tableau 4.1b. Les stations analysées. Régime régularisé d'Homogénéisation.....	135
Tableau 4.1c. Stations analysées. Régime régularisé de Type naturel.....	136
Tableau 4.2. Les six indices pour estimer les débits réservés écologiques au Québec (Belzile et al. 1997).....	136
Tableau 4.3a. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les fréquences au non dépassement des débits réservés en aval des barrages. Résultats de l'analyse de variance.....	137
Tableau 4.3b. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages. Résultats de l'analyse de variance.....	138
Tableau 4.4a. Comparaison des fréquences moyennes saisonnières (%) du nombre des jours dont les débits réservés écologiques sont supérieurs aux débits journaliers lâchés en aval du barrage en régimes d'Inversion et de Type naturel (1960-1990).....	138
Tableau 4.4b. Comparaison des fréquences moyennes en fonction des saisons en régimes	

d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.....	139
Tableau 4.4c. Comparaison des fréquences moyennes saisonnières deux à deux.	
Valeurs critiques du test de Scheffé.....	139
Tableau 4.4d. Comparaison des fréquences moyennes en fonction de saisons et du régime hydrologique. Résultats de l’analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé).....	140
Tableau 4.5a. Comparaison des moyennes des écarts (%) de magnitude entre les débits réservés écologiques et les débits journaliers lâchés en aval du barrage en régimes d’Inversion et de Type naturel (1960-1990).....	140
Tableau 4.5b. Comparaison des moyennes des écarts de magnitude en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.....	141
Tableau 4.5c. Comparaison des moyennes des écarts en fonction de saisons et du régime hydrologique. Résultats de l’analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé).....	141

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1a. Coefficients d'écoulements mensuels (%) du régime d'Inversion (Rivière Matawin).....	16
Figure 1.1b. Coefficients d'écoulements mensuels (%) du régime d'Homogénéisation (Rivière Gordon).....	16
Figure 1.1c. Coefficients d'écoulements mensuels (%) du régime de Type naturel (Rivière Chicoutimi).....	17
Figure 1.2. Localisation des stations analysées.....	20

CHAPITRE 2

Figure 2.1. Localisation des stations.....	77
Figure 2.2. Relation entre nombre d'années et (a) moyennes arithmétiques des débits moyens annuels et (b) coefficients de variation des débits moyens annuels en rivières naturelles (RN)....	78
Figure 2.3. Comparaison de la moyenne arithmétique des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).....	79
Figure 2.4. Comparaison des valeurs maximales des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).....	80
Figure 2.5. Comparaison des valeurs minimales des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).....	81
Figure 2.6. Comparaison des coefficients de variation des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).....	82
Figure 2.7. Comparaison des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des courbes de distribution des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).....	83
Figure 2.8. Comparaison des coefficients d'aplatissement des courbes de distribution des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).....	84

Figure 2.9. Comparaison des débits moyens mensuels minimums entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR) au mois de mai en régime d’Inversion.....	85
--	----

CHAPITRE 3

Figure 3.1. Location of natural river stations (triangles) and regulated river stations (stars).....	108
Figure 3.2. Comparison of frequencies of monthly maximum (a) and minimum (b) flows of natural rivers (black) and regulated rivers (gray).....	109
Figure 3.3. Comparison of the coefficients of variation of the dates of occurrence of the monthly maximum (a) and minimum (b) flows of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles).....	110
Figure 3.4. Comparison of the monthly average flows of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles). a = January, b = March; c = May; d = April.....	111
Figure 3.5. Comparison of the coefficients of variation of magnitude of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles). a = May; b = December.....	112
Figure 3.6. Comparison of the coefficients of asymmetry of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles). a = May; b = December.....	113

CHAPITRE 4

Figure 4.1. Localisation des stations analysées. Régime d’Inversion (points), régime d’Homogénéisation (carrés), régime de Type naturel (triangles).....	145
Figure 4.2. Écoulements mensuels des débits. a = régime d’Inversion (rivière Bonnard), b = régime d’Homogénéisation (rivière Hart Jaune), c = régime de Type naturel (rivière Batisca).....	146
Figure 4.3. Relation entre fréquences et superficies des bassins versants. a = régime d’Inversion, b = régime d’Homogénéisation, c = régime de Type naturel.....	147

CHAPITRE 1

RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

1.1. INTRODUCTION

Le Québec possède sans nul doute un potentiel hydroélectrique considérable, résultat des différences structurales entre le Bouclier Canadien rigide et les dépôts sédimentaires qui forment les basses Terres du Saint-Laurent. L’empreinte de ces différences structurales se traduit par des cours d’eau caractérisés par des profils en long irréguliers, jalonnés par des chutes et rapides qui constituent des sites propices à la construction de nombreux barrages hydroélectriques. Selon ASTRADE (1998), on y dénombre près de 10 000 barrages et digues construits depuis le 19^{ème} siècle. En 1996, 97 % de l’électricité disponible sur le réseau provincial était d’origine hydraulique, le Québec étant alors devenu le troisième producteur mondial d’hydroélectricité. Pourtant, malgré la présence de ces nombreux barrages, il existe encore très peu d’études pour quantifier leurs impacts hydrologiques, comme le stipule PATOINE et al. (1999) dans leur mémoire sur la gestion de l’eau au Québec.

Ce projet s’insère dans un programme de recherche qui vise la quantification des impacts des barrages sur les régimes hydrologiques, la morphologie des chenaux et le transport des sédiments, la flore et la faune aquatique et riparienne. Ce programme a pour finalité l’élaboration de mesures d’atténuation des impacts des barrages et de restauration des tronçons régularisés. En continuité avec les travaux antérieurs (ASSANI, 2000; ASSANI et al., 2004, 2005a, 2005b), le présent projet de recherche, objet de ce mémoire, porte sur l’influence des modes de gestion et de la taille des bassins versants des impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels et mensuels ainsi que sur la comparaison avec les normes des débits réservés écologiques pour la protection des habitats du poisson au Québec.

1.2. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES IMPACTS HYDROLOGIQUES DES BARRAGES

Créé il y a 5000 ans au Proche-Orient pour des besoins d’irrigation, les barrages sont considérés comme l’une des composantes majeures de la civilisation industrielle. Ils sont construits pour diverses finalités : la production de l’énergie hydroélectrique, l’irrigation,

l'alimentation en eau des agglomérations, la lutte contre les inondations, les activités récréo-touristiques, la préservation des habitats des poissons, etc. Cependant, malgré ces multiples rôles qui sont bénéfiques pour l'homme, ces ouvrages engendrent des conséquences non négligeables sur les régimes hydrologiques qui sont le principal facteur de fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux (PETTS, 1984). L'ampleur des modifications induites par les barrages sur les régimes hydrologiques de rivières dépend des cinq facteurs suivants : le mode de gestion des barrages, qui dépend d'objectifs assignés à ceux-ci, la taille des bassins versants qui détermine en grande partie la dimension des barrages, le nombre des barrages construits sur une rivière ou dans le bassin versant, l'âge des barrages et le climat (BATALLA et al., 2004; MAGILLIAN et NISLOW, 2005 ; PETTS, 1984). Ces modifications des régimes hydrologiques altèrent la composition, la structure ou le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, ripariens et humides à travers leurs effets sur les caractéristiques physiques des habitats incluant la température, l'oxygène, la chimie de l'eau et la taille des particules sédimentaires (BRAVARD et PETTS, 1993; DYNESIUS et NILSSON, 1994).

Malgré les conséquences des modifications hydrologiques induites par les barrages, il existe encore peu de travaux consacrés uniquement à ce sujet comme l'avait déjà souligné VIVIAN (1994). La plupart des études d'impacts hydrologiques des barrages font partie intégrante de sous-sections pour expliquer les impacts des barrages sur les caractéristiques géomorphologiques ou sur la faune et la flore (e.g. PETTS, 1984; WILLIAMS et WOLMAN, 1984). Cinq critiques principales ont été formulées à l'endroit des travaux consacrés aux impacts hydrologiques des barrages :

1. La première critique soulevée par l'analyse des études d'impacts hydrologiques des barrages est l'absence de classification des modes de gestion des barrages ou des régimes hydrologiques des rivières régularisées (ASSANI et al, 2004; POFF et HART, 2002). Cette absence entraîne deux conséquences importantes : (1) elle rend malaisée la comparaison d'impacts hydrologiques des barrages en fonction de leurs modes de gestion, (2) on ne peut ainsi quantifier de manière précise l'influence de ce facteur sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages.

2. L'absence totale de travaux consacrés à l'influence de la taille des bassins versants sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages. Cette absence s'explique par le fait que les méthodes utilisées jusqu'à présent pour quantifier les impacts des barrages ne permettent pas d'analyser l'influence de ce facteur car les stations sont analysées séparément.
3. Les travaux ne tiennent pas compte de toutes les caractéristiques des débits pour quantifier les impacts hydrologiques des barrages. Or, chaque caractéristique des débits contribue au fonctionnement des écosystèmes aquatiques (RICHTER et al., 1996).
4. Au Québec, on note une absence totale des travaux sur les impacts hydrologiques des barrages aux échelles annuelles et mensuelles malgré leur nombre élevé.
5. L'absence de vérification des débits lâchés en aval des barrages par rapport aux normes de débits réservés écologiques pour protéger les habitats du poisson au Québec.

1.3. PROBLÉMATIQUE DU PROJET DE RECHERCHE

C'est pour répondre à ces cinq critiques que nous avons entrepris de quantifier les impacts hydrologiques des barrages aux échelles annuelles et mensuelles au Québec.

En ce qui concerne le mode de gestion des barrages, l'analyse en composantes principales des débits saisonniers a permis d'identifier trois types de régimes hydrologiques artificialisés correspondant chacun à un mode de gestion spécifique (Assani et al., 2004) : Inversion, Homogénéisation et Type naturel.

1. Le régime d'Inversion est le régime le plus modifié par les barrages car toutes les caractéristiques des débits sont modifiées. Le régime est caractérisé par une hausse significative des débits saisonniers hivernaux, estivaux et automnaux et des débits mensuels minimums d'une part et une baisse significative des débits printaniers et des débits mensuels maximums, d'autre part (figure 1.1a). On observe un changement des mois d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums, c'est-à-dire que les débits mensuels maximums surviennent en hiver et les débits mensuels minimums au printemps, donc l'inverse de ce qui se produit en condition naturelle. Il y a donc une

inversion du cycle naturel des débits. Ce régime s'observe exclusivement sur la rive Nord du bassin du fleuve Saint-Laurent en aval des barrages-réservoirs et des centrales hydroélectriques alimentées en période hivernale.

2. Le régime d'Homogénéisation est caractérisé par une uniformisation des débits mensuels et saisonniers durant toute l'année (figure 1.1b). Les débits maximums surviennent souvent au printemps mais parfois en hiver. En revanche, contrairement au régime précédent, les débits minimums mensuels et saisonniers ne surviennent jamais au printemps. La variation inter-mensuelle des débits est très faible comparativement au régime précédent. Les débits restent presque constants toute l'année. Ce régime est exclusivement observé, ou presque, sur la rive Nord du fleuve Saint-Laurent. Ce régime est associé aux bassins versants de grande taille ou lorsque les réservoirs sont couplés aux centrales hydroélectriques.
3. Le régime de type « naturel » est le régime le moins modifié par les barrages. Toutefois, toutes les caractéristiques des débits sont modifiées mais avec moins d'ampleur comparativement aux deux autres régimes. Tout d'abord, on observe une légère hausse des débits hivernaux et des débits mensuels minimums et une faible baisse des débits printaniers et des débits mensuels maximums. En ce qui concerne la période d'occurrence des débits, le changement affecte seulement la période des débits mensuels minimums qui arrive fréquemment en été (figure 1.1c). Ce régime est associé aux barrages construits au fil de l'eau et qui sont presque tous dotés de centrales hydroélectriques.

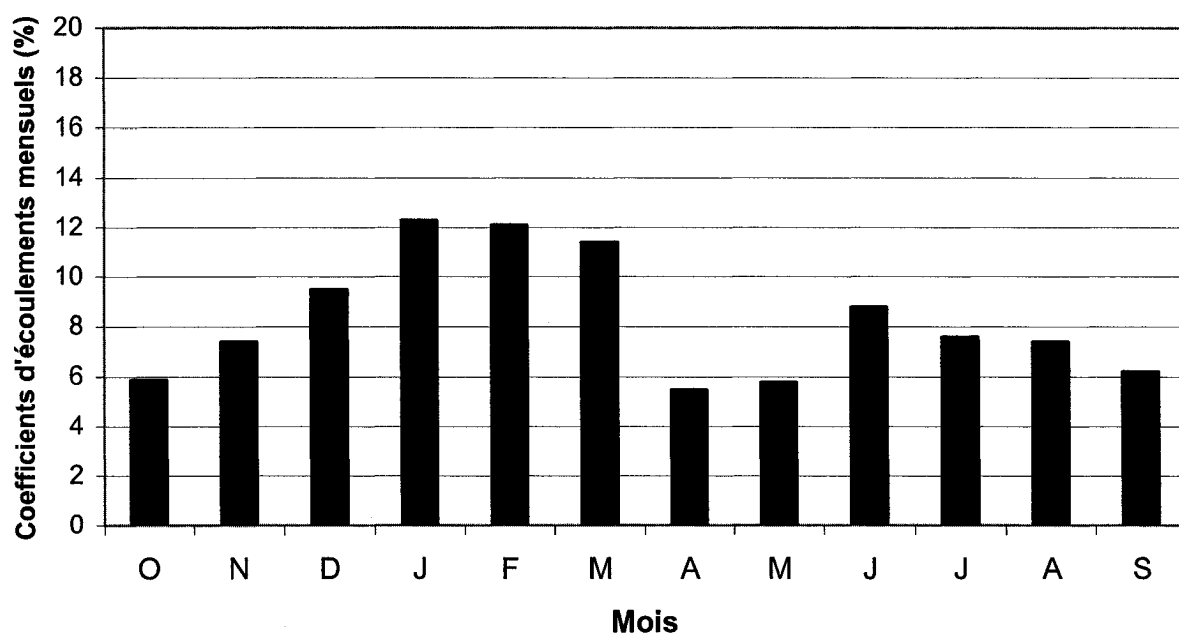


Figure 1.1a. Coefficients d'écoulements mensuels (%) du régime d'Inversion (Rivière Matawin).

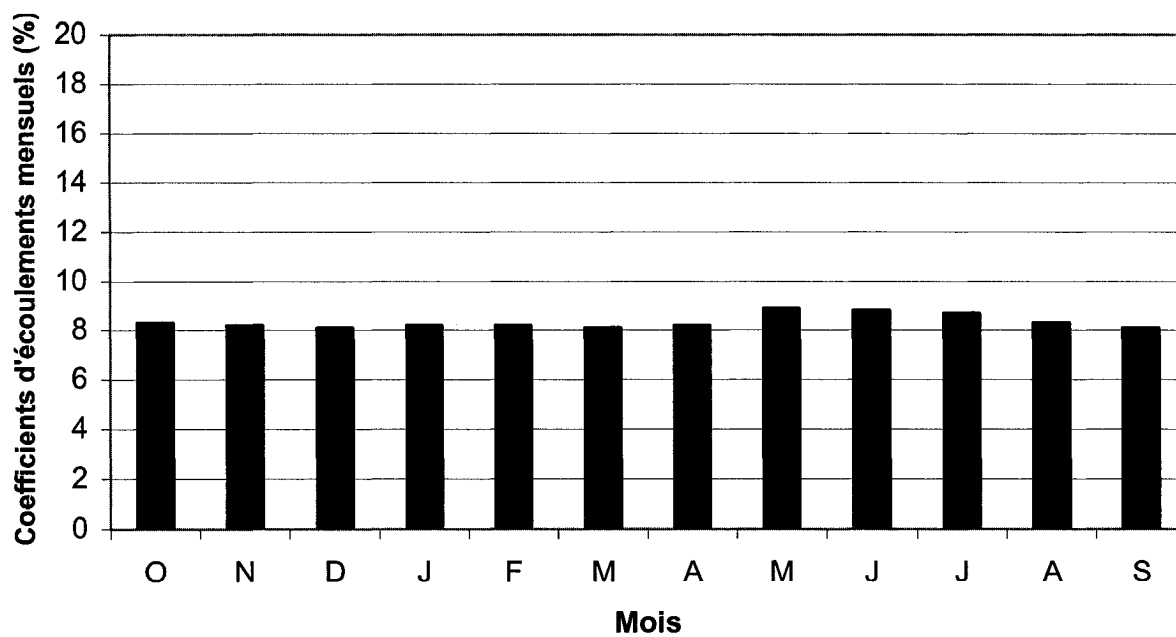


Figure 1.1b. Coefficients d'écoulements mensuels (%) du régime d'Homogénéisation (Rivière Gordon).

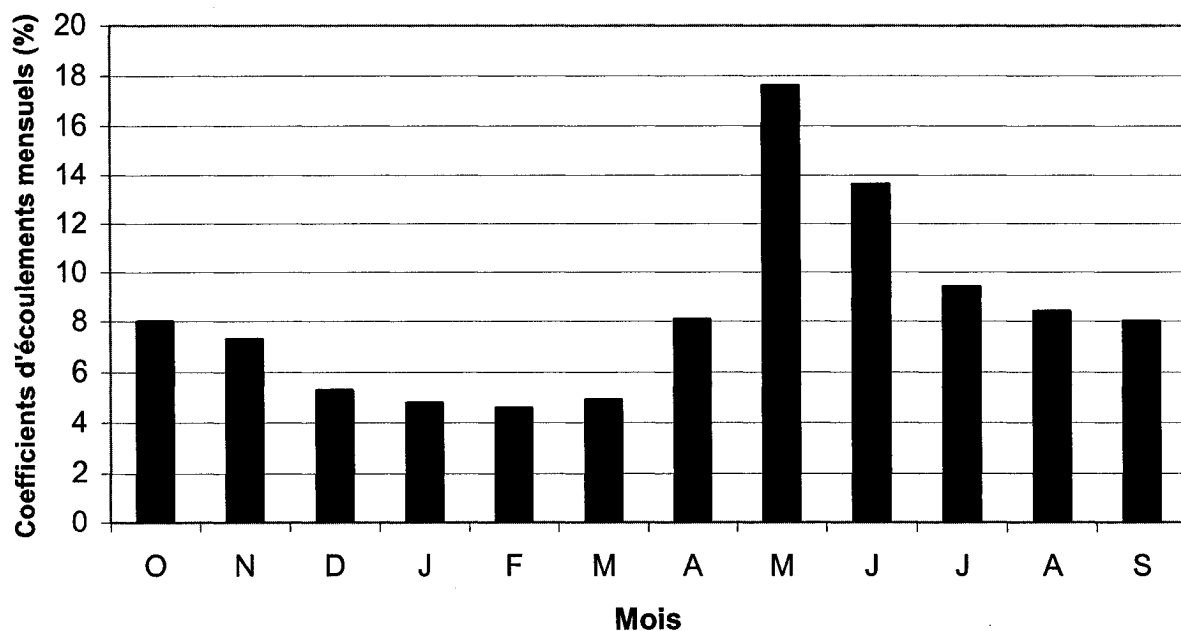


Figure 1.1c. Coefficients d'écoulements mensuels (%) du régime de Type naturel (Rivière Chicoutimi).

1.4. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Notre projet de recherche poursuit les deux objectifs principaux suivants :

1. Analyser les impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels et mensuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants.
2. Vérifier le respect des normes des débits réservés en aval des barrages pour la protection des habitats du poisson au Québec.

1.4.1 Hypothèses relatives aux débits moyens annuels

Pour analyser les impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels, nous avons posé les deux hypothèses suivantes :

1. À l'instar des débits journaliers, le stockage de l'eau pendant la période chaude et végétative dans les réservoirs (régime d'Inversion) entraîne une diminution de la magnitude des débits moyens annuels suite à la perte d'eau par évapotranspiration.
2. Malgré l'évacuation de toute la quantité d'eau stockée durant une année hydrologique, le stockage d'eau dans les réservoirs, en modifiant les conditions d'écoulement naturel, peut entraîner des changements des autres caractéristiques des débits moyens annuels. Par ailleurs, l'ampleur de ces modifications dépend du type de régime hydrologique régularisé (mode de gestion du barrage) et de la taille des bassins versants.

1.4.2 Hypothèses relatives aux débits moyens mensuels

Deux hypothèses ont été formulées pour les impacts des barrages sur les débits moyens mensuels :

1. Les barrages modifient toutes les caractéristiques des débits moyens mensuels mais à des degrés différents.
2. L'ampleur de ces modifications dépend de la taille des bassins versants et du type de régime hydrologique artificialisé.

1.4.3 Hypothèse relative à la comparaison des débits lâchés en aval des barrages et les normes de débits réservés

1. Le respect des normes des débits réservés écologiques en aval des barrages dépend de l'ampleur des modifications induites par les barrages, c'est-à-dire du mode gestion et de la taille des bassins versants.

1.5. MÉTHODOLOGIE

1.5.1 Sources des données et choix des stations

Le réseau hydrographique de la province de Québec peut être regroupé en trois grands bassins hydrographiques (figure 1.2) : le bassin du fleuve Saint-Laurent (581000 km^2) et les bassins des Baies d'Ungava (340000 km^2) et d'Hudson (585000 km^2). Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons seulement au premier bassin versant, celui du Saint-Laurent, puisque

nous n'avons pas pu disposer des données des débits des rivières régularisées des deux autres bassins. Quoi qu'il en soit, mentionnons que la plupart des barrages hydroélectriques sont construits dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent. Les stations étudiées ont été extraites du CD-ROM HYDAT d'ENVIRONNEMENT CANADA (2000) qui est une base de données qui contient les mesures calculées à partir des données enregistrées aux stations hydrométriques (en service ou fermées) du Canada. Cette base de données contient le numéro fédéral et le nom de la station, les débits moyens annuels et mensuels. Il est précisé si les valeurs des débits ont été corrigées en tenant compte de l'effet de glace. Sont aussi publiées les données sur la superficie du bassin versant au droit de la station hydrologique, les coordonnées géographiques (latitude et longitude) et le nom du gestionnaire de la station ainsi que l'état (naturel ou régularisé) du cours d'eau. Il convient de préciser que le mot « régularisé » a été utilisé dans son sens le plus large, c'est-à-dire toute modification du courant d'eau d'origine anthropique. Il peut s'agir d'un simple seuil déversant ou d'un endiguement des berges destiné à contenir l'eau dans le chenal principal. Nous avons retenu 76 stations en rivières naturelles et 61 en rivières régularisées. Ces stations ont toutes plus de 10 ans de données sur la période s'étalant entre 1910 et 2000.

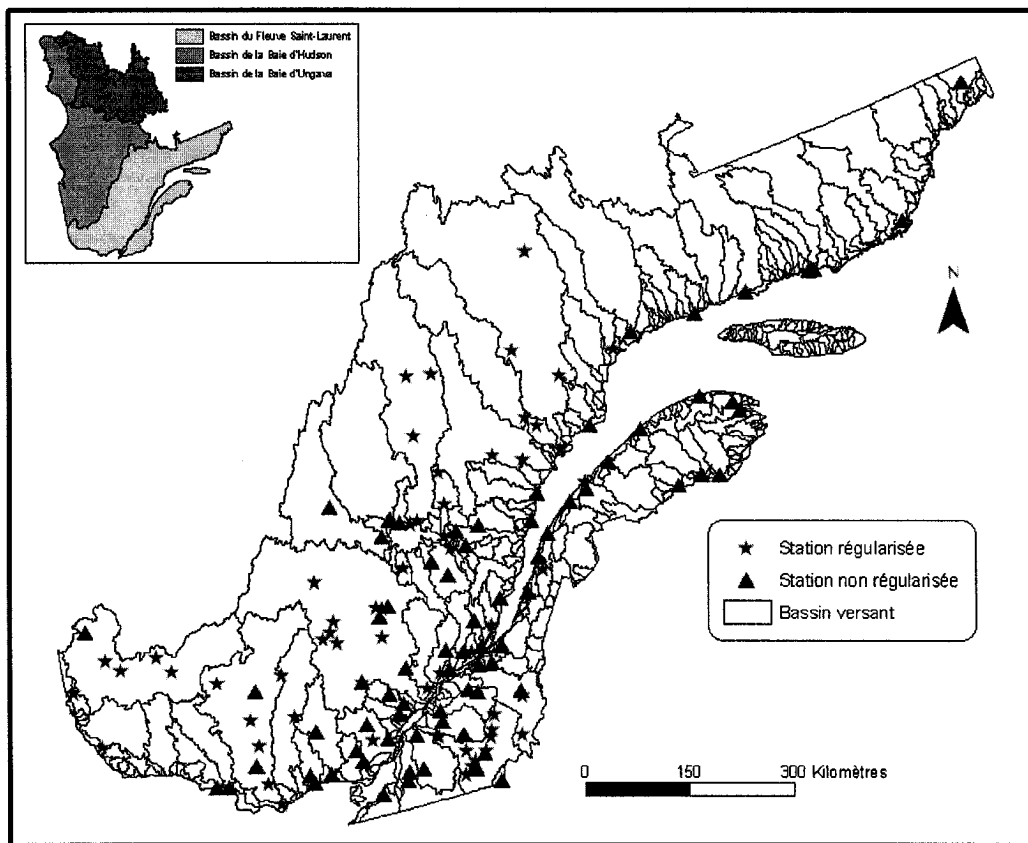


Figure 1.2. Localisation des stations analysées.

1.5.2 Caractérisation des débits annuels et mensuels et méthode d'analyse des données

Du point de vue écologique, RICHTER et al. (1996) ont montré que les débits d'une rivière peuvent être décrits par les cinq caractéristiques suivantes : la magnitude, la période d'occurrence, la durée, l'amplitude de la variation et la fréquence. Ces cinq caractéristiques (tableau 1.1) sont quantitativement décrites par 32 variables hydrologiques connues sous le nom d'Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA). Elles permettent de détecter et de quantifier les impacts d'origine anthropique notamment les barrages sur les régimes hydrologiques naturels. Pour notre étude, nous ne possédons que les débits moyens annuels et mensuels car les données journalières des débits mesurés au niveau des barrages sont difficilement accessibles. En fait, l'accès à ces données révélerait la production journalière de l'énergie hydroélectrique au niveau de chaque barrage. Conséquemment, nous ne pouvions donc pas tenir compte de

l'ensemble des cinq caractéristiques pour analyser les impacts des barrages sur les débits. Nous avons donc retenu les caractéristiques se limitant aux débits moyens annuels: la magnitude, la variabilité inter-annuelle et la forme de la courbe de distribution. En ce qui a trait aux débits moyens mensuels, les six caractéristiques suivantes ont été retenues : la magnitude, la variabilité de la magnitude, la fréquence, les périodes d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums ainsi que leur variabilité et la forme (asymétrie) de la courbe de distribution des débits.

Tableau 1.1. Les cinq caractéristiques des débits et leurs rôles écologiques (adapté de RICHTER et al., 1996).

Caractéristiques	Exemple de l'influence sur l'écologie des écosystèmes aquatiques
Magnitude (12 variables)	Volume d'habitat disponible pour les espèces aquatiques et semi-aquatiques.
Période d'occurrence (10 variables)	Satisfaction de certains besoins pour le cycle vital des espèces. Degré de stress ou de mortalité associé aux conditions extrêmes.
Fréquence (4 variables)	Dynamique de population (reproduction et mortalité des espèces.
Durée (2 variables)	Durée de stress et accomplissement des phases du cycle vital.
Variabilité (4 variables)	Variation du volume d'habitat disponible. Degré de stress.

Dans la littérature, trois méthodes sont couramment utilisées pour analyser les impacts de barrages :

- La méthode de station témoin consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (BATALLA et al., 2004; ERSKINE et al., 1999; RICHTER et al., 1997). C'est la méthode la plus couramment utilisée dans la littérature scientifique.
- La méthode de station contrôle basée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (ASSANI et al., 2002) ou sur la comparaison des débits mesurés sur

une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage (BENN et ERSKINE, 1994).

- La méthode de simulation hydrologique qui consiste à comparer les débits naturels reconstitués au moyen d'un modèle hydrologique aux débits mesurés à une station hydrométrique. Cette reconstitution peut se faire à partir de la production journalière de l'énergie électrique (ASSANI et al., 1999) ou au moyen d'un modèle hydrologique (MAHESHWARI et al., 1995; PETERS et PROWSE, 2001). Ce dernier permet d'abord de reconstituer les débits en conditions naturelles, et ensuite les comparer aux débits lâchés en aval d'un barrage. Comparativement aux autres approches, la reconstitution des débits naturels par un modèle hydrologique adéquat est très laborieux, ce qui limite son application.

Dans le cadre de cette étude, nous ne pouvions pas appliquer l'une de ces trois méthodes pour les raisons suivantes :

- Nous ne disposons pas de données de débits ni avant la construction des barrages ni en amont des barrages.
- Il est impossible de simuler les débits naturels au moyen d'un modèle hydrologique unique pour toutes les stations analysées. De plus, l'élaboration d'un modèle hydrologique est un processus long et fastidieux et ne peut se justifier dans le cadre de ce travail. C'est une méthode généralement utilisée lorsqu'on travaille sur une seule station ou sur plusieurs stations d'une même rivière.

Nous avons ainsi utilisé une nouvelle méthode d'analyse d'impacts de barrages qui consiste à comparer les débits en rivières naturelles et les débits en rivières influencées par les barrages en fonction de la taille des bassins versants (méthode de proportionnalité) pour une variable hydrologique donnée. Nous avons donc analysé les impacts des barrages en fonction de leurs modes de gestion (régimes d'Inversion, d'Homogénéisation et de Type naturel) et de la taille des bassins versants (taille variant entre 100 et 30 000 km²). Cette approche se justifie du fait qu'en rivières naturelles, il existe une forte corrélation entre les débits et les superficies de bassins versants au Québec (BELZILE et al., 1997). Cette comparaison a été effectuée à l'aide

d'une analyse de variance en fonction du type de données (caractéristiques des débits). Toutefois lorsqu'il n'était pas possible d'appliquer ce test statistique, par exemple lorsque le test de variance n'est pas statistiquement significatif ou ne peut être appliqué, nous nous sommes contentés de comparer les données par une approche graphique. Cette approche consiste tout simplement à comparer une variable hydrologique mesurée en rivières naturelles et en rivières influencées par les barrages sur un graphique représentant la variable étudiée en ordonnée et la taille des bassins versants en abscisse. La nouvelle approche que nous proposons présente l'avantage de comparer simultanément des bassins versants de différentes tailles. Cette comparaison permet de quantifier l'influence de la taille des bassins versants sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages.

1.5.3 Comparaison entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages

L'un des objectifs de cette étude est de comparer et de vérifier le respect des normes des débits réservés écologiques en aval des barrages. Les méthodes d'élaboration des débits réservés écologiques sont exposées en détail dans BELZILE et al. (1997). Nous n'y reviendrons pas dans le cadre de cette étude. Ce sont des méthodes hydrologiques adaptées au Québec pour répondre aux besoins spécifiques des différentes régions hydro-écologiques afin de mieux protéger les habitats du poisson en général et des espèces de poissons cibles en particulier durant les différentes périodes (mois et saisons) de l'année. Les espèces cibles sont des espèces qui requièrent plus d'attention que d'autres en raison du fait qu'elles soient rares ou menacées, qu'elles présentent incontestablement un intérêt sportif ou économique, ou encore qu'elles soient particulièrement sensibles à une modification des conditions naturelles d'écoulement à des moments précis de leur cycle vital. Le nombre de ces espèces cibles varie d'une région hydrologique à une autre. Pour plus détails sur ces espèces, lire BELZILE et al. (1997). Ces auteurs ont proposé 6 indices de débits réservés écologiques qui tiennent compte des régions hydrologiques et des phases critiques du cycle vital des espèces cibles durant l'année. Ces indices sont résumés au tableau 1.2. Ces normes ont été approuvées par FAUNE ET PARCS QUÉBEC (1999).

Tableau 1.2. Les 6 indices pour estimer les débits réservés écologiques au Québec (BELZILE et al., 1997).

Indice	Signification	Période d'application	Régions Hydrologiques d'application
0.5QMA	Moitié du débit moyen annuel	Toutes les saisons	Toutes les régions
0.3 QMA	30% du débit moyen annuel	Saison automnale	H-3
0.25 QMA	25% du débit moyen annuel	Saison hivernale	Toutes les régions
0.5 QMP	Moitié du débit de la période (saison)	Saison printanière	Toutes les régions
Q ₅₀ Août	Débit médian du mois d'août	Saison estivale	Toutes les régions
Q ₅₀ Sept.	Débit médian du mois de septembre	Saison automnale	Toutes les régions

Pour estimer les débits réservés écologiques en aval des barrages, nous avons procédé selon les étapes suivantes :

1. Déterminer la région éco-hydrologique d'appartenance de la station influencée directement par un barrage. Cette détermination a été faite au moyen des coordonnées géographiques de la station.
2. Tenir compte du mois ou de la saison pour laquelle on veut estimer le débit réservé.

Ces deux éléments nous ont permis de choisir l'indice et les coefficients de l'équation pour estimer les débits réservés écologiques à une station influencée directement par un barrage. Cette équation est de la forme suivante:

$$Q_r = e^k \cdot S^a \quad e = 2.71828 \quad (1)$$

où Q_r est le débit réservé (en m^3/s) à estimer à une station donnée dont la superficie du bassin versant est S (km^2), k et a sont des exposants régionalisés et saisonnalisés. Leurs valeurs dépendent de la région éco-hydrologique et de la saison ainsi que des phases critiques du cycle vital des espèces de poissons cibles dans ces différentes régions. Les valeurs de ces coefficients sont fournies par BELZILE et al. (1997) en fonction de ces différents facteurs.

Pour protéger les habitats du poisson en aval des barrages, les débits lâchés en aval des barrages ne doivent jamais être inférieurs aux débits réservés. Pour vérifier ce constat deux caractéristiques ont été comparées entre elles: la fréquence et la magnitude des débits. Pour la fréquence, nous avons calculé le rapport entre le nombre de jours dont le débit journalier lâché était inférieur au débit réservé estimé, et ce pour chaque mois. Les débits journaliers sont fournis pour quelques rivières seulement. Finalement, le calcul de la moyenne des fréquences a été effectué pour toutes les stations ayant une période historique commune de 30 ans (1960-1990).

Concernant l'analyse de la magnitude des débits, deux étapes ont été suivies :

- Lorsque les débits réservés étaient supérieurs aux débits lâchés en aval des barrages, nous avons calculé leur écart au moyen de la relation suivante :

$$E (\%) = \frac{(Q_r - Q_o) \times 100}{Q_r} \quad (2)$$

où Q_o est le débit journalier lâché en aval d'un barrage en m^3/s .

- Nous avons aussi calculé la moyenne de ces écarts (écarts journaliers de trois mois qui définissent la saison) et l'intervalle de confiance des écarts.

1.6. RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

1.6.1 Les caractéristiques des débits moyens annuels

Les principaux résultats obtenus sont résumés au tableau 1.3. Il ressort de ce tableau les considérations suivantes :

Tableau 1.3. Modifications des caractéristiques des débits moyens annuels.

Caractéristiques	Régime d’Inversion	Régime d’Homogénéisation	Régime de Type naturel
Magnitude			
Variation de la magnitude	+		
Fréquence P5	—		
Fréquence P10	—		
Fréquence P90			
Fréquence P95			
Qmin	—		
Qmax			
Variabilité inter-annuelle	+		
Forme de la courbe	±	±	±
Coefficient d’aplatissement	+	+	+

+ : augmentation, - : diminution, ± = augmentation et diminution selon la taille des bassins versants.

- L’ampleur des modifications dépend du type de régime et de la taille des bassins versants.
- Pour ce qui est du volume d’écoulement, le changement intervient seulement en régime d’Inversion (diminution des percentiles 5, 10 et des débits minimums annuels).

- La variabilité de la magnitude est relativement forte en régime d’Inversion par rapport aux rivières naturelles.
- Les barrages modifient la forme de la courbe de distribution (baisse et hausse du coefficient d’asymétrie ainsi qu’une hausse du coefficient d’aplatissement dans les trois types de régimes régularisés).

1.6.2 Les caractéristiques des débits moyens mensuels

À l’échelle mensuelle, nous avons observé les changements suivants (tableaux 1.4) :

Tableau 1.4. Modifications des caractéristiques des débits moyens mensuels associés au régime d’Inversion en fonction des mois.

Caractéristiques des débits	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
Mois d’occurrence (Maximum)	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Mois d’occurrence (minimum)		+		-	-	-	+	+	+		-	-
Variabilité des mois d’occurrence (maximum)	Augmentation											
Variabilité des mois d’occurrence (minimum)	Diminution											
Magnitude			+	+	+	+	-	-	-			
Variabilité de la magnitude	-	-					±	+	+		-	
Fréquence (P90)			+	+	+	+	-	-	-	±	+	
Fréquence (P10)	±	±	+	+	+	+	-	-	-	-		±
Coefficient d’asymétrie			-	-	-	-		+	+	-		
Coefficient de kurtosis			-	-	-	-	+	+				

+ : augmentation, - : diminution, ± = augmentation et diminution selon la taille des bassins versants.

- Toutes les caractéristiques fondamentales des débits sont modifiées en aval des barrages, mais leur ampleur dépend du type de régime.
- Les modifications dépendent des mois et se traduisent par une hausse, une baisse ou une hausse et une baisse simultanées des débits en fonction de la taille des bassins versant.
- Les barrages modifient les dates d'occurrence des débits moyens mensuels maximums et minimums ainsi que leur variabilité inter-annuelle sauf pour le régime de Type naturel pour qui aucun changement n'est observé concernant cette variabilité.
- Les barrages-réservoir influencent les débits surtout en période hivernal, printanière et estival à cause de la production d'hydroélectricité en hiver et le remplissage des réservoir lors de la fonte des neiges et durant l'été.

1.6.3 Comparaison des débits lâchés en aval des barrages avec les normes des débits réservés

Précisons d'emblée que nous avons exclu le régime d'Homogénéisation dans cette comparaison car le nombre des stations analysées était trop faible (deux stations seulement). La fréquence et l'écart de la magnitude des débits ont permis de détecter l'influence du non respect des normes des débits réservés. À la lumière des analyses qui ont été faites, le mode de gestion, la taille du bassin versant et la saison sont les trois facteurs qui déterminent l'ampleur des modifications des variables qui ont été analysées (tableaux 1.5, 1.6 et 1.7).

Tableau 1.5. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les fréquences au non dépassement des débits réservés en aval des barrages. Résultats de l'analyse de variance.

Échelle	Régime d'Inversion					Régime du Type naturel				
	a	b	R ²	F	p	a	b	R ²	F	P
Annuelle	-0,002	53,075	0,5017	7,05	0,03	-0,002	54,475	0,3837	3,11	0,140
Automne	-0,003	46,818	0,4743	6,32	0,04	-0,005	65,093	0,5246	5,52	0,070
Hiver	-0,001	18,195	0,2335	2,13	0,19	-0,004	35,508	0,5393	5,62	0,060
Printemps	-0,001	86,105	0,1481	1,22	0,31	-0,003	59,832	0,0035	0,02	0,900
Été	-0,003	61,183	0,5006	7,02	0,03	0,0004	57,469	0,0023	0,01	0,920

p = valeur critique de F. Les valeurs significatives de p au seuil de 0,05 apparaissent en gras.

Tableau 1.6. Comparaison des fréquences moyennes en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.

Source de variation	Régime d’Inversion					Régime du Type naturel				
	SC	CM	DF	F	p	SC	CM	DF	F	P
Saisons	22128,3	7376,1	3	18,882	0,000	6115,1	2038,4	3	4,532	0,012
Erreur résiduelle	12500,4	390,6	32			10794,6	449,8	24		

SC = Somme des carrés; CM = Carré moyen; DF = nombre de degrés de liberté; p = Valeurs critique de F. Les valeurs significatives au seuil de 0,05 apparaissent en gras.

Tableau 1.7. Comparaison des moyennes des écarts de magnitude en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.

Source de variation	Régime d’Inversion					Régime du Type naturel				
	SC	CM	DF	F	p	SC	CM	DF	F	P
Saisons	2515,7	838,6	3	1,337	0,280	106,5	35,5	3	0,080	0,970
Erreur résiduelle	20065,3	627,4	32			10688	445,3	24		

SC = Somme des carrés; CM = Carré moyen; DF = nombre de degrés de liberté; p = Valeur critique de F.

L'analyse démontre clairement que c'est en régime d'Inversion que les débits réservés ne sont pas souvent respectés en aval des barrages. En effet, le nombre des jours où les débits observés sont inférieurs aux débits réservés est plus important en régime d'Inversion que dans le régime de Type naturel. L'influence de la taille des bassins versants se manifeste beaucoup plus en régime d'Inversion. C'est surtout pour les petit ($< 10000 \text{ km}^2$) et les moyens bassins versants que le nombre de jours à débits inférieurs aux débits réservés est plus important. En ce qui concerne la saison, les régimes d'Inversion et de Type naturel sont caractérisés par une fréquence plus élevée au printemps et en été du nombre des jours des débits inférieurs aux débits réservés. Le contraire est observé en hiver et en automne. Il faut noter cependant qu'en régime de Type naturel les différences de fréquences ne sont pas aussi prononcées qu'en régime d'Inversion. Globalement, les écarts entre les débits lâchés en aval des barrages et les débits réservés dépassent 50 %. À la lumière de ces considérations, il faut souligner que c'est le régime d'Inversion qui est celui dont les normes sont les moins respectées en aval des barrages.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSANI A.A. 2000. Modélisation des impacts des barrages sur l'hydrologie et la morphologie des cours d'eau au Québec (Canada). I. Impacts des barrages sur les régimes hydrologiques et la variabilité temporelle des débits annuels. Rapport de recherche n° 1, Université de Montréal, 65p.
- ASSANI A.A., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G. 2002. Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l'Eau* **15**, 557-574.
- ASSANI A.A., GRAVEL E., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G. 2004. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques des rivières régularisées au Québec. Application de l'approche écologique. Submitted to *Canadian Water Resources Journal*.
- ASSANI A.A., GRAVEL E., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G. 2005a. Impacts des barrages sur les débits minimums annuels en fonction des régimes hydrologiques artificialisés. *Revue des Sciences de l'Eau* **18**, 103-127.
- ASSANI A.A., PETIT F., MABILLE G. 1999. Analyse des débits de la Warche aux barrages de Butgenbach et de Robertville (Ardenne belge). *Bulletin de la Société Géographique de Liège* **36**, 17-30.
- ASSANI A.A., STICHELBOU E., ROY A.G., PETIT F. 2005b. Comparison of impacts on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes. *Hydrological Processes* (in press).
- ASTRADE L. 1998. La gestion des barrages-réservoirs au Québec: exemples d'enjeux environnementaux. *Annales de Géographie* **604**, 590-609.
- BATALLA R.M., GOMEZ C.M., KONDOLF G.M. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of hydrology* **290**, 117-136.
- BELZILE L., BÉRUBÉ P., HOANG V.D., LECLERC M. 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Report submitted by INRS-Eau and Groupe-conseil Génivar inc. to the Ministère de l'Environnement et de la Faune and Fisheries and Oceans Canada. 83 pp. + 8 annexes.
- BENN P.C., ERSKINE W.D. 1994. Complex channel response to flow regulation : Cudgong River below Windamere Dam, Australia. *Applied Geography* **14**, 153-168.

- BRAVARD J.P., PETTS G.E., Interférences avec les interventions humaines, dans: AMOROS C. et PETTS G.E., Éditeurs, *Hydrosystemes Fluviaux*, Masson, Paris (1993).
- CLAUSSEN B., BIGGS B.J.F. 2000. Flow variable for ecological studies in temperature streams: grouping based on covariance. *Journal of Hydrology* **237**, 184-197.
- DYNESIUS M., NILSSON N. 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern 3RD of the world. *Science* **266**, 753-762.
- ERSKINE W.D., TERRAZZOLO N., WARNER R.F. 1999. River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of large hydro-electric power project: Snowy River, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management* **15**, 3-24.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2000), CD-ROM HYDAT.
- FAUNE ET PARCS QUÉBEC (FAPAQ), 1999. Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats. Ministère de l'environnement et de la faune du Québec, Direction de la faune et des habitats, Québec.
- MAGILLIAN F.J., NISLOW K.H. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* (in press).
- MAHESHWARI B.L., WALKER K.F., MCMAHON T.A. 1995. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management* **10**, 15-38.
- OLDEN J.D., POFF N.L. 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications* **19**, 101-121.
- PATOINE A., BLAIS A-M., FORGET M-H., LAMONTAGNE S., MARTY J. 1999. Respecter la variabilité naturelle pour une gestion durable des ressources aquatiques. Mémoire remis au Bureau des audiences publiques sur l'environnement dans le cadre des audiences publiques sur la gestion de l'eau au Québec, Montréal, 16 p. + annexes.
- PETERS D.L., PROWSE T. 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Processes* **15**, 3181-3194.
- PETTS G.S. 1984: Impounded Rivers. Perspective for Ecological Management, Wiley, New York. 326 p.
- POFF N.L., HART D.D. 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience* **25**, 659-668.

- RITCHER B.D., BAUMGARTNER J.V., POWELL J., BRAUN D.P. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conservation Biology* **10**, 1163-1174.
- RITCHER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* **37**, 231-249.
- RITCHER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P., POWELL J. 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research and Management* **14**, 329-340.
- VIVIAN H. 1994. L'hydrologie artificialisée de l'Isère en amont de Grenoble. Essai de quantification des impacts des aménagements. *Revue de Géographie Alpine* **2**, 97-112.
- WILLIAMS G.P., WOLMAN M.G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. In: *Geological Survey Professional Paper* 1286, U.S. Government Printing Office, Washington, DC v+83 pp.

CHAPITRE 2

Article soumis à la Revue des Sciences de l'Eau

IMPACTS DES BARRAGES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MOYENS ANNUELS EN FONCTION DU MODE DE GESTION ET DE LA TAILLE DES BASSINS VERSANTS AU QUÉBEC.

Ali A. ASSANI*, Francis LAJOIE* et Charles LALIBERTÉ*

* Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, Section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tél. : (819) 376-5011 ; Fax : 376-5179 ; Email : Ali.Assani@uqtr.ca

Adresse de correspondance

Ali A. ASSANI

Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, Section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois- Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tél. : (819) 376-5011 ; Fax : 376-5179 ; Email : Ali.Assani@uqtr.ca

Titre court : **IMPACTS DES BARRAGES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉBITS MOYENS ANNUELS.**

RÉSUMÉ

Nous avons comparé les impacts des barrages sur les caractéristiques (volume d'écoulement-fréquence, variabilité inter-annuelle et forme de courbe de distribution) des débits moyens annuels dans les trois régimes régularisés observés (Inversion, Homogénéisation et Type naturel) au Québec. En ce qui concerne le volume d'écoulement-fréquence et sa variabilité inter-annuelle, le changement a été observé seulement en régime d'Inversion. Il se traduit par une baisse des débits moyens annuels durant les années hydrologiques sèches et une variabilité inter-annuelle relativement forte par rapport aux rivières naturelles. Ces changements sont attribués principalement au mode de gestion des réservoirs car on lâche moins d'eau durant ces années hydrologiques sèches. Quant aux coefficients d'asymétrie et d'aplatissement, les changements ont surtout affecté le régime d'Homogénéisation. L'ampleur de changement qui affecte les coefficients d'asymétrie est influencée par la taille des bassins versants. Cette étude démontre que les barrages peuvent modifier toutes les caractéristiques des débits moyens annuels contrairement à l'opinion couramment admise.

Mots clés : débits moyens annuels, Inversion, Homogénéisation, Type naturel, barrages, volume d'écoulement, fréquence, variabilité inter-annuelle, asymétrie, aplatissement, Québec.

DAMS EFFECTS ON THE MEAN ANNUAL FLOW CHARACTERISTICS ACCORDING THE MANAGEMENT MODE AND THE DRAINAGE AREA BASIN IN QUÉBEC.

SUMMARY

It's generally agreement that dams don't change the mean annual flow (MAF) characteristics since water stored in reservoirs is fully released in the year. However, this opinion never is checked in Québec, albeit the large amount of dams. To fill this gap, we analyzed the dams effects on the mean annual flow characteristics. This analysis is based on two following hypothesis :

- The water storage during warm and vegetative seasons (Spring and Summer) can cause mean annual flow magnitude because of high evapotraspiration. Thus, the alteration of MAF depend to management mode of dams, whic defines the hydrological regime downstream from dams.
- In spite of the full release of water stored in the reservoirs in the year, this fact storing can change the others mean annual characteristics beaucuse it changes the natural flow cycle.

To check these two hypothesis, we compared the mean annual flow charactristics between the regulated rivers (61 stations) and the pristine rivers (76 stations) by means of analysis of variance and "graph method". This approach simply consists of comparing a hydrologic variable measured in natural rivers and in regulated rivers on a graph representing the studied variable as the ordinate and the watershed size as the abscissa. Regarding the artificialized hydrologic

regimes, i.e. the hydrologic regimes directly influenced by the dams, analysis of the monthly and seasonally flows by means of the Principal Component Analysis (PCA) revealed three types of regimes. Each type corresponds to a specific dam management mode.

- The Inversed flow regime is characterized by the monthly maximum discharges in winter (December to March) and the monthly minimum discharges in the spring (April to May) when the snow is melting. The natural hydrologic cycle is therefore completely inversed. This type of flow regime is observed exclusively on the north shore of the St. Lawrence River due to the low winter flow and high power production in the winter.
- The Homogenization flow regime is characterized by a low variation in monthly discharges. This is a less contrasted regime than the previous one. In fact, the ratio between the monthly maximum and minimum discharges is close to 1, while under natural conditions it is always greater than 10. Moreover, contrary to the previous regime, the monthly minimum discharges flows never occur in the spring when the snow is melting. On the other hand, the monthly maximum flows can be observed in winter. This regulated hydrologic regime is very frequent on the north shore.
- The Natural type flow regime is characterized by the absence of change in the periods of occurrence of the monthly maximum and/or minimum flows. It is comparable to the flow regimes of pristine rivers. Thus, the monthly maximum discharges occur in the spring when the snow is melting, while the monthly minimum flows occur in winter and/or summer. Contrary to the previous two regimes, it is found on both shores of the St. Lawrence River.

As for mean annual flow characteristics, we defined the three following characteristics : the magnitude-frequency, the inter-annual variability and the shape on distribution curve (coefficient of skewness and coefficient of kurtosis). For magnitude-frequency characteristic, we considered three hydrological variables : the maximum and minimum values of MAF and the average (arithmetic mean) of MAF.

It emerges in this analysis the followings changes from downstream of dams :

- In Inversed flow regime, we observed a significant decrease of minimum value of MAF (dry hydrological years), an increase of inter-annual variability of MAF for drainage area $> 5000 \text{ km}^2$), an increase of rivers characterized by negative skewness and high value of coefficient of kurtosis. The decrease of magnitude of MAF is due to management operation whic consists to store a great amount of water in reservoirs during the dry hydrological years.
- In Homogenization flow regime, we observed an increase of inter-annual variability of MAF, an increase of rivers characterized by negative skewness and high value of coefficient of kurtosis.
- In the Natural type regime, we observed little change.

This study show that dams change the MAF characteristics. But this change depends on the regulated hydrological regime and the drainage area.

Key words : annual mean discharges, Inversion, Homogenization, Natural type, dams, magnitude, frequency, interannual variability, skewness, kurtosis, Québec.

2.1. INTRODUCTION

Il existe une controverse relative aux impacts des barrages sur les débits moyens annuels malgré les changements des débits observés aux échelles mensuelles et journalières. Selon l'opinion couramment admise, les barrages ne modifient pas les débits moyens annuels puisque toute la quantité d'eau stockée au cours d'une année hydrologique est intégralement lâchée (ANCTIL et COULIBALY, 2004), en excluant, bien entendu, le cas de transfert inter-bassins d'eau. Cependant, certaines études ont mis en évidence le changement des débits moyens annuels en aval des barrages (e.g. BATALLA *et al.* 2004; CHURCH 1995). Il convient de noter que ces études se limitent souvent à un seul bassin versant. De plus, elles n'analysent qu'une seule caractéristique des débits moyens annuels, à savoir son volume d'écoulement. Par conséquent, on ignore totalement si les barrages peuvent modifier les autres caractéristiques malgré l'évacuation de toute la quantité d'eau stockée durant une année hydrologique. Sur le plan écologique, ces caractéristiques jouent tout aussi un rôle très important dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. La variabilité inter-annuelle est sans nul doute l'une des principales caractéristiques fondamentales de débits qui présente un intérêt majeur en écologie aquatique en raison de son influence significative sur la dynamique des populations ainsi que sur la composition et le fonctionnement des écosystèmes lotiques notamment (BIGGS *et al.* 2005; POFF *et al.* 1997; RICHTER *et al.* 1996). C'est ainsi qu'au Québec, par exemple, les fluctuations inter-annuelles des débits influencent de manière significative la biomasse et la composition spécifique de la végétation humide du fleuve Saint-Laurent (HUDON 1997, 2004). La biomasse et le nombre d'espèces végétales augmentent durant les années sèches mais diminuent durant les années humides. De même en Nouvelle Zélande, BIGGS *et al.* (1999, 2005) avaient mis en évidence l'influence de ces fluctuations inter-annuelles des débits sur la biomasse des périphytons et la

production des invertébrés des rivières. D'autres auteurs ont démontré l'influence de la variabilité inter-annuelle des débits sur les populations de poissons (HAYES 1995; McINTOCH 2000). Les modifications qui affectent la succession des années sèches et humides peuvent modifier profondément l'équilibre des organismes en aval des barrages. Pourtant ces modifications sont plausibles du fait que l'évacuation des débits en aval des barrages ne s'effectue pas de la même façon que dans les conditions naturelles tant en ce qui concerne la fréquence que la quantité d'eau lâchée. Ainsi, dans le cas de la rivière Matawin au Québec, les périodes sèches et humides duraient plus longtemps en aval qu'en amont du barrage (ASSANI *et al.* 2002). Par ailleurs, une analyse comparée de la variabilité inter-annuelle des débits aux échelles annuelle, saisonnière et journalière en aval de quatre des barrages construits sur la rivière Saint-Maurice a mis en évidence l'influence du mode de gestion des barrages. Ainsi, la variabilité inter-annuelle des débits était plus forte en régime d'Inversion qu'en régime de Type naturel aux échelles annuelle et saisonnière (ASSANI 2004).

Au Québec, malgré la présence de nombreux barrages et la diversité de leur mode de gestion, aucune étude n'a jamais été entreprise pour analyser les impacts des barrages sur les débits moyens annuels. Notre objectif est de combler cette lacune en vérifiant les deux hypothèses suivantes :

1. La diversité de modes de gestion des barrages et de taille des bassins versants peut entraîner des impacts différents sur les débits moyens annuels. En effet, les études sur les impacts hydrologiques déjà effectuées aux échelles mensuelle et journalière ont démontré que l'ampleur des changements hydrologiques induits par les barrages dépend du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec (ASSANI *et al.* 2005a, 2005b;

LAJOIE *et al.* 2005). À l'échelle journalière, les barrages provoquent une baisse significative des débits minimums et maximums annuels. Mais cette baisse est plus importante pour les petits bassins versants en ce qui concerne les débits minimums annuels et pour les grands bassins versants quant aux débits maximums annuels. Par ailleurs, cette diminution était plus importante en régime d'Inversion que dans les deux autres régimes hydrologiques régularisés. Il était donc intéressant de vérifier si cette diminution des débits, observée aux échelles mensuelle et journalière, se répercutait à l'échelle annuelle.

2. Malgré l'évacuation de toute la quantité d'eau stockée durant une année hydrologique, le stockage d'eau dans les réservoirs, en modifiant les conditions d'écoulement naturel, peut entraîner des changements des autres caractéristiques des débits moyens annuels comme la variabilité inter-annuelle. Ces changements ont été observés aux échelles mensuelles et journalières. L'ampleur de ces changements dépendait du mode de gestion et de la taille des bassins versants.

Pour vérifier ces deux hypothèses, nous allons comparer les impacts de barrages dans les trois régimes hydrologiques artificialisés (mode de gestion) décrits au Québec en fonction de la taille des bassins versants (ASSANI *et al.* 2004).

2.2. MÉTHODOLOGIE

2.2.1. Sources des données

Les données des débits moyens annuels proviennent du CD-ROM HYDAT édité par ENVIRONNEMENT CANADA (2000). Nous avons analysé 76 en rivières naturelles et 61 en

rivières régularisées. Les débits ont été mesurés pendant la période 1910 et 2000. La durée des mesures de débits n'est pas la même pour toutes les rivières. Celles-ci appartiennent aux affluents du fleuve Saint-Laurent (figure 2.1) sur les deux rives du fleuve. Pour les rivières régularisées, cette régularisation se limite seulement à la construction des barrages. D'autres formes d'aménagements comme le transfert inter-bassins ou l'irrigation susceptibles de modifier les caractéristiques des débits moyens annuels y sont absentes. Nous avons analysé les impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels. Ceux-ci peuvent être définis par quatre caractéristiques seulement (ASSANI 2003), qui sont consignées dans le tableau 2.1. Chaque caractéristique a été définie par au moins une variable hydrologique. Il convient de préciser que les deux caractéristiques volume d'écoulement et fréquence sont difficiles à différencier car elles sont exprimées par les mêmes unités, à savoir la quantité d'eau par unité de temps. Dans ce travail, en ce qui concerne le volume d'écoulement, pour chaque année hydrologique, qui commence à octobre et se termine à septembre de l'année civile suivante, nous avons d'abord calculé la moyenne arithmétique de 12 valeurs mensuelles, qu'on appelle DMA (débit moyen annuel). Ensuite, à chaque station, nous avons calculé la moyenne arithmétique de valeurs des DMA. Cette dernière moyenne a été appelée la moyenne des débits moyens annuels (MDMA). C'est cette variable qui a été utilisée pour définir le volume d'écoulement. En ce qui concerne la fréquence des débits, afin de pouvoir vérifier si les conditions hydrologiques (sèches ou humides) peuvent avoir un impact sur la gestion des barrages, nous avons retenu six variables hydrologiques : trois variables hydrologiques pour définir les années hydrologiques humides et trois autres pour définir les années hydrologiques sèches. En ce qui concerne les années hydrologiques humides, nous avons utilisé les variables suivantes : le débit maximum des DMA (D_{max} , le débit moyen annuel le plus élevé), les valeurs des débits moyens annuels correspondant aux percentiles 95 (P95) et 90 (P90). Quant aux années sèches, les trois variables

analysées sont : le débit minimum des DMA (D_{min} , le débit moyen annuel le plus faible) ainsi que les valeurs des débits moyens annuels correspondant aux percentiles 5 (P5) et 10 (P10). Toutes les six variables ont été déduites des séries hydrologiques analysées constituées des valeurs de DMA. Quant au coefficient de variation (CV), qui est le rapport entre la moyenne arithmétique des DMA et son écart type, il a été aussi calculé à partir des séries hydrologiques constituées de valeurs de DMA. Il en est de même des coefficients d'asymétrie (CAS) et d'aplatissement (CAP) de Pearson.

2.2.2. Justification de la méthode d'analyse des données

Dans la littérature, trois méthodes sont couramment utilisées pour analyser les impacts de barrages.

- La méthode de station témoin qui consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (RICHTER *et al.* 1997).
- La méthode de station de contrôle fondée sur la comparaison des débits mesurés en amont et en aval d'un barrage (ASSANI *et al.* 2002) ou sur la comparaison des débits mesurés sur une rivière non influencée par un barrage et en aval d'un barrage (BENN et ERSKINE 1994).
- La méthode de reconstitution qui consiste à comparer les débits reconstitués en condition naturelle et les débits lâchés en aval d'un barrage. Cette reconstitution des débits peut être effectuée à partir de la production journalière de l'énergie électrique (ASSANI *et al.* 1999) ou au moyen d'un modèle hydrologique (MAHESHWARI *et al.* 1995; PETERS et PROWSE 2001).

Dans le cadre de cette étude, nous ne pouvions appliquer aucune de ces trois méthodes pour les raisons suivantes :

- Ces trois méthodes ne permettent pas de mettre en évidence l'influence du mode de gestion des barrages et de la taille des bassins versants sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages du fait qu'elles consistent à analyser les stations séparément. Or, pour mettre en évidence l'influence de ces facteurs, il faut absolument comparer simultanément les bassins versants de différentes tailles. Ainsi, l'utilisation de l'une de ces trois méthodes ne nous permettrait pas de vérifier les deux hypothèses sur lesquelles se fonde notre étude.
- Nous ne disposions pas de données de débits ni avant la construction des barrages ni en amont des barrages. Par conséquent, on ne pouvait pas appliquer les deux premières méthodes.
- Il est impossible de simuler les débits naturels au moyen d'un modèle hydrologique unique pour toutes les stations analysées (60 stations). De plus, l'élaboration d'un modèle hydrologique est un processus long et fastidieux et ne peut se justifier dans le cadre de ce travail. C'est une méthode généralement utilisée lorsqu'on travaille sur une seule station ou sur plusieurs stations d'une même rivière.

Nous avons ainsi utilisé une nouvelle méthode d'analyse d'impacts de barrages qui consiste à comparer les débits en rivières naturelles et les débits en rivières influencées par les barrages en fonction de la taille des bassins versants (méthode de proportionnalité). Cette approche se justifie du fait qu'en rivières naturelles, il existe une forte proportionnalité entre les débits (annuels, mensuels et journaliers) et les superficies de bassins versants au Québec

(ASSANI *et al.* 2005a, 2005b; BELZILE *et al.* 1997) malgré l'influence des autres facteurs physiographiques. À titre d'exemple, la figure 2.2 présente la relation entre le nombre d'années de mesure des débits et deux variables hydrologiques qui sont la moyenne (MDMA) et les coefficients de variation (CV) des débits moyens annuels de rivières non régularisées. Dans les deux cas, la valeur du coefficient de détermination calculée entre les deux variables est inférieure à 1%. En d'autres termes, le nombre d'années de mesure n'a aucune influence sur la variabilité spatiale des débits moyens annuels. Il en est de même de coefficients de variation. L'absence de l'influence du nombre d'années de mesure sur les caractéristiques des débits moyens annuels nous autorise à tenir compte de toutes les stations indépendamment de la durée et de la période de mesure des débits aussi bien en rivières naturelles qu'en rivières régularisées. Toutefois, pour des raisons statistiques, nous avons retenu des stations dont les mesures des débits s'étendent sur au moins 10 ans, seuil minimum considéré comme suffisant pour les analyses statistiques en hydrologie.

La méthode de proportionnalité utilisée dans cette étude pour comparer les débits de rivières régularisées et non régularisées comprend deux étapes importantes.

1. La première étape consiste à calculer deux régressions, après transformation logarithmique, entre les débits moyens annuels et les superficies de bassins versants pour les rivières non régularisées d'une part, et pour les rivières régularisées, d'autre part. La significativité de chaque droite de régression est testée par la méthode de l'analyse de variance. Si les deux régressions sont statistiquement significatives, on compare leurs paramètres (pente et ordonnée à l'origine) au moyen de l'analyse de variance ou du test t de Student. L'objectif de cette étape est de pouvoir déterminer si la relation entre les

débites et la superficie des bassins versants est significativement différente en rivières naturelles et en rivières régularisées. C'est cette étape qui permet de déterminer l'influence du mode de gestion des barrages et de la taille des bassins versants sur les caractéristiques des débits.

2. Lorsque les deux régressions sont significativement différentes, la seconde étape consiste à quantifier l'ampleur du changement (hausse ou baisse) qui affecte les débits en rivières régularisées. Cette quantification consiste à analyser séparément les stations. Pour quantifier ce changement, nous avons procédé par les étapes suivantes (ASSANI *et al.* 2005a, 2005b) :

- Nous avons comparé les débits moyens annuels observés (DO) à chaque station influencée par les barrages aux débits moyens annuels estimés (DE), à partir des superficies des bassins versants, par la régression établie entre les débits et la taille des bassins versants en rivières naturelles. Le débit moyen annuel estimé (DE) correspond théoriquement au débit moyen annuel qui devrait être observé à une station sans la présence d'un barrage. Cette estimation se justifie par le fait qu'il existe une très forte proportionnalité entre les débits moyens annuels et les superficies de bassins versants en condition naturelle comme nous le verrons plus loin.
- Ensuite, nous avons calculé les intervalles de confiance des DE au seuil de 95%.
- Enfin, à chaque station, nous avons comparé les valeurs des DO et DE en tenant compte, bien entendu, de l'intervalle de confiance de ce dernier. Lorsque le débit mesuré en aval d'un barrage (DO) se situait à l'intérieur de cet intervalle de confiance, nous avons donc considéré que les deux débits (DE et DO) n'étaient

pas significativement différents même si les régressions ajustées sur l'ensemble des stations le sont. Ainsi, il n'y a aucun changement significatif des débits induit par le barrage à cette station. On conçoit aisément que l'ampleur des impacts hydrologiques ne peut être la même pour tous les barrages même si ceux-ci sont soumis au même mode de gestion. À première vue, la méthode de proportionnalité peut paraître relativement moins précise que la méthode de «station témoin», par exemple, dans la quantification des changements de débits induits par les barrages. En fait, ce n'est point le cas. En effet, elle permet aussi de quantifier avec précision le changement qui affecte le débit en aval d'un barrage au moyen d'un test statistique rigoureux par le calcul d'intervalles de confiance comme nous venons de le démontrer. De plus, son avantage incontestable par rapport aux trois autres méthodes est de pouvoir analyser simultanément les bassins versants de différentes tailles (étape 1). On peut ainsi déterminer à la fois l'influence de la taille des bassins versants et du mode de gestion de barrages sur l'ampleur des changements induits par ceux-ci sur les débits. Son utilisation est donc scientifiquement justifiée. Par ailleurs, elle présente plusieurs points communs avec les trois autres méthodes. Comme la méthode de station témoin, elle permet de quantifier de manière précise les changements des débits induits par un barrage comme nous venons de le souligner. Elle utilise les données de débits qui ne sont pas mesurées sur la même rivière sur laquelle est construit un barrage comme la méthode de station contrôle. Enfin, elle utilise les données des débits estimés en condition naturelle pour quantifier les changements hydrologiques comme la méthode de reconstitution.

En cas d'absence de proportionnalité ou de faible proportionnalité (lorsque les deux ou une de deux régressions ajustées sur les données ne sont pas statistiquement significatives) entre une variable hydrologique et la superficie des bassins versants, nous avons procédé par une simple comparaison graphique (méthode graphique). Cette approche est aussi utilisée dans le cadre de trois autres méthodes susmentionnées. Elle permet d'évaluer de manière qualitative (hausse ou baisse de la variable hydrologique analysée) les changements induits par un barrage lorsqu'une évaluation quantitative ne peut être appliquée.

En ce qui concerne le mode de gestion des barrages au Québec, nous avons mis en évidence trois régimes hydrologiques artificialisés à partir des débits mensuels et saisonniers (ASSANI *et al.* 2004). Chaque régime hydrologique artificialisé correspond à un mode de gestion spécifique (figure 2.2).

- Le régime d'Inversion est le régime le plus affecté par les barrages car toutes les caractéristiques des débits sont modifiées. Le régime est caractérisé par une hausse significative des débits saisonniers hivernaux, estivaux et automnaux et des débits mensuels minimums d'une part et une baisse significative des débits printaniers et des débits mensuels maximums, d'autre part. On y observe un changement des mois d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums, c'est-à-dire que les débits mensuels maximums surviennent en hiver et les débits mensuels minimums au printemps donc l'inverse de ce qui se produit en condition naturelle. Il y a donc une inversion du cycle naturel des débits. Ce régime s'observe exclusivement sur la rive Nord du bassin du fleuve Saint-Laurent en aval des barrages-réservoirs afin d'alimenter les centrales hydroélectriques construites en aval en période hivernale.

- Le régime d'Homogénéisation est caractérisé par une uniformisation des débits mensuels et saisonniers durant toute l'année. Les débits maximums surviennent souvent au printemps mais parfois en hiver. En revanche, contrairement au régime précédent, les débits minimums mensuels et saisonniers ne surviennent jamais au printemps. La variation inter-mensuelle des débits est très faible comparativement au régime précédent. Les débits restent ainsi presque constants toute l'année. Ce régime est aussi presque exclusivement observé sur la rive Nord du fleuve Saint-Laurent. Il est associé aux bassins versants de grande taille ou lorsque les réservoirs sont couplés aux centrales hydroélectriques.
- Le régime de type « naturel » est le régime le moins modifié par les barrages. Toutefois, toutes les caractéristiques des débits sont modifiées mais avec moins d'ampleur par rapport aux deux autres régimes. Tout d'abord, on observe une légère hausse des débits hivernaux et des débits mensuels minimums mais une faible baisse des débits printaniers et des débits mensuels maximums. En ce qui concerne la période d'occurrence des débits, le changement affecte seulement la période des débits mensuels minimums qui arrive fréquemment en été. Ce régime est associé aux barrages construits au fil de l'eau et qui sont presque tous dotés de centrales hydroélectriques.

2.3. RÉSULTATS

2.3.1. Impacts des barrages sur le volume d'écoulement et la fréquence des débits moyens annuels

La figure 2.3 compare les valeurs des moyennes des débits moyens annuels entre les rivières naturelles et les rivières régularisées dans les trois régimes hydrologiques artificialisés.

Les régressions ajustées sur les rivières naturelles et les rivières régularisées sont statistiquement significatives. La comparaison de paramètres (pente et ordonné à l'origine) de ces régressions au moyen de l'analyse de variance n'a révélé aucune différence significative (tableau 2.2). Sur la figure 2.3, on observe clairement que les régressions et les débits de rivières non régularisées et régularisées se superposent. À la lumière de ces résultats, nous pouvons donc conclure que les barrages ne modifient pas significativement les moyennes des débits moyens annuels au Québec. De plus, le rapport de proportionnalité entre les moyennes des débits moyens annuels et la superficie des bassins versants est conservé en aval des barrages.

Pour déterminer l'influence des conditions hydrologiques, nous avons comparé aussi les débits moyens annuels maximums (années hydrologiques humides) d'une part (figure 2.4) et les débits moyens annuels minimums (années hydrologiques sèches) d'autre part (figure 2.5). En ce qui concerne les débits moyens annuels maximums (D_{max}), aucune différence significative n'a été observée entre les rivières non régularisées et les rivières régularisées comme le confirme le test de l'analyse de variance (tableau 2.2). Par conséquent, les barrages ne modifient pas les débits moyens annuels pendant les années hydrologiques humides. En revanche, pour les débits moyens annuels minimums (D_{min}), une différence significative a été observée en régime d'Inversion. Il se produit donc un changement significatif des débits moyens annuels en aval de ce type de barrages. Comme le montre la figure 2.6a, ce changement se traduit par une baisse significative des débits. Pour confirmer ces résultats, nous avons analysé d'autres percentiles qui définissent les années humides (P95 et P90) et les années sèches (P10 et P5). Les résultats de comparaison, consignés dans le tableau 2.2, confirment la différence significative entre les rivières naturelles et les rivières régularisées en régime d'Inversion. En effet, l'analyse de variance a révélé des différences statistiquement significatives entre les régressions ajustées sur

les rivières non régularisées et les rivières régularisées en régime d’Inversion pendant les années hydrologiques sèches (P5 et P10). En aval des réservoirs caractérisés par un régime d’Inversion, il se produit une baisse significative des débits moyens annuels durant les années sèches. Pour les deux autres régimes hydrologiques artificialisés, l’influence des barrages se traduit par une baisse des valeurs de coefficients de détermination (R^2). En aval des barrages, la valeur de R^2 devient inférieure à 90%. Il s’ensuit que les barrages affectent la proportionnalité entre les débits moyens annuels et la superficie des bassins versants.

Pour quantifier la baisse des débits observée en régime d’Inversion, nous avons comparé les valeurs de débits moyens annuels minimums observés (DO) et de débits moyens annuels minimums estimés (DE) selon la démarche décrite dans la partie méthodologique. Pour environ 35% des stations, les valeurs de DE et de DO sont significativement différentes car DO se situe à l’extérieur de l’intervalle de confiance de DE. L’écart le plus élevé entre DE et DO a été observé en aval du réservoir de la rivière Manicouagan (Manic V). La valeur de DO ne représente que 5% de celle de DE, soit une diminution de l’ordre de 95%. Il faut cependant noter que cette valeur de DO a été enregistrée une année après la construction du réservoir. Cette importante réduction serait due au remplissage du réservoir qui est parmi les plus importants au monde. Quoi qu’il en soit, si on considère les valeurs des débits correspondant aux percentiles 5 (P5) et 10 (P10), on observe une diminution des débits respectivement de 70% et 53%. Durant les années sèches, les débits moyens annuels lâchés en aval du réservoir Manic V représentent moins de la moitié des débits qui devraient être mesurés en condition naturelle. Il en est de même des autres rivières comme Mondonac ou des Outaouais. En conclusion, cette étude démontre de manière évidente que les barrages provoquent une baisse significative des débits moyens annuels au Québec. Mais cette baisse ne survient que lors des années hydrologiques sèches et n’affectent que seulement les

barrages caractérisés par un régime d’Inversion dont les débits peuvent diminuer de plus de la moitié pour certaines rivières.

2.3.2. Impacts des barrages sur la variabilité inter-annuelle des débits

Les valeurs de coefficients de variation sont présentées à la figure 2.6. Notons d’emblée qu’en ce qui concerne les coefficients de variation, aussi bien en rivières naturelles qu’en rivières régularisées, il n’existe aucun lien significatif entre les valeurs de coefficients de variation et la taille des bassins versants. Néanmoins, en rivières naturelles, on peut observer que pour les rivières de taille inférieure à 5 000 km², les coefficients de variation sont globalement plus élevés que pour les rivières de grande taille. De plus, la valeur maximale pour ces rivières est d’environ 30% alors qu’elle ne dépasse pas 25% pour les autres rivières. Quant aux rivières régularisées, on observe de manière évidente qu’en régime d’Inversion, les deux valeurs seuils sont dépassées par la plupart des rivières. Par conséquent, ce régime est caractérisé par une variabilité inter-annuelle des débits relativement plus forte qu’en régime naturel. Pour les deux autres régimes régularisés, nous n’avons observé aucune différence significative entre les rivières naturelles et les rivières régularisées.

À l’instar du volume d’écoulement, les changements le plus apparents de la variabilité inter-annuelle des débits moyens annuels sont observés seulement en régime d’Inversion. Ces changements se traduisent par une variabilité inter-annuelle relativement plus forte qu’en rivières naturelles.

2.3.3. Impacts des barrages sur la forme de la courbe de distribution des débits moyens annuels

Rappelons que les formes de courbe de distribution ont été définies par les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de Pearson. En ce qui concerne les valeurs de coefficients d'asymétrie, elles sont présentées à la figure 2.7. Il ressort de cette figure que les changements les plus importants affectent surtout le régime d'Homogénéisation (figure 2.7b). Ce changement dépend de la taille des bassins versants. Pour les bassins versants de taille supérieure à 10 000 km², on observe globalement une hausse des valeurs des coefficients d'asymétrie en aval des barrages où la valeur de 0,5 est dépassée contrairement aux rivières non régularisées. Pour les bassins versants de taille comprise entre 5 000 et 10 000 km², on observe plutôt une baisse des valeurs de coefficients d'asymétrie, qui deviennent inférieures à -1. Il faut cependant noter qu'on dispose seulement de deux stations en aval du barrage. Pour les stations de taille inférieure à 5 000 km², aucun changement n'a été observé. En régime d'Inversion (figure 2.7a), on doit surtout noter une tendance à la baisse des valeurs de coefficients d'asymétrie pour les grands bassins versants (10 000 km²). Quant au régime de Type naturel, on observe une hausse et une baisse des valeurs de coefficients d'asymétrie pour quelques bassins versants.

Quant au coefficient d'aplatissement, on note une hausse des valeurs pour quelques rivières en aval des barrages (figure 2.8). En effet, en rivières naturelles, la valeur du coefficient d'aplatissement n'excède pas 2. Ce seuil est fréquemment dépassé en aval des barrages. Le changement a été surtout observé en régime d'Homogénéisation pour les rivières de taille supérieure à 5 000 km² (figure 2.8b).

Ces résultats révèlent que les impacts de barrages sur la forme de distribution affecte surtout le régime d'Homogénéisation et plus particulièrement les bassins versants de taille supérieure à 5 000 km². Ces impacts se traduisent par une hausse des valeurs de coefficients d'asymétrie et d'aplatissement.

2.4. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse des impacts des barrages sur les débits de rivières poursuit quatre objectifs :

1. La quantification des changements induits par les barrages sur les caractéristiques des débits. Il s'agit en fait de déterminer l'ampleur des modifications hydrologiques provoquées par un barrage. Jusqu'à présent, c'est le seul objectif poursuivi par toutes les études consacrées aux impacts hydrologiques des barrages. Mais cet objectif ne peut déboucher sur l'élaboration des politiques de gestion, de conservation et de restauration des tronçons régularisés. C'est la faiblesse majeure de cet objectif. Cette élaboration est la finalité de toute étude d'impacts hydrologiques induits par les barrages. Pour atteindre cette finalité, nous avons défini d'autres objectifs suivants.
2. La détermination des facteurs qui influencent l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages.
3. La détermination des caractéristiques hydrologiques les plus modifiées par les barrages.
4. Enfin, l'influence des conditions hydrologiques sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages.

En ce qui concerne la quantification de l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages, toutes les méthodes (méthodes de station témoin, de contrôle et de reconstitution) couramment utilisées dans la littérature sont destinées à atteindre cet objectif. Cependant, deux de ces trois méthodes présentent des faiblesses qui réduisent leur précision dans la quantification de l'ampleur des modifications hydrologiques des débits induite par un barrage. Dans le cas des méthodes de reconstitution, les données des débits reconstituées en condition naturelle sont entachées des erreurs liées au modèle hydrologique utilisé et aux formules de conversion de la quantité du kilowatts produite en débits d'eau. Deux modèles hydrologiques différents ne peuvent pas fournir exactement les mêmes valeurs de débits. Quant aux formules de conversion, les erreurs sont dues à une série des variables comme le niveau du réservoir, l'ouverture des vannes, la topographie du réservoir, etc. Ces différentes erreurs sont difficiles à quantifier pour déterminer si l'écart entre les débits lâchés en aval d'un barrage et les débits reconstitués peut être considéré comme statistiquement significatif. La méthode de station contrôle ne permet pas une quantification précise des changements qui affectent les débits. C'est une méthode qualitative qui permet de conclure si il y a eu hausse ou baisse des débits après la construction d'un barrage. Ainsi, comparée à ces deux méthodes, la méthode de proportionnalité utilisée dans ce travail est beaucoup plus précise. Sa précision peut atteindre celle de la méthode de station témoin car les deux méthodes permettent de conclure sur la base d'un test statistique rigoureux si les débits mesurés en aval des barrages sont significativement différents de ceux mesurés en condition naturelle. La méthode de proportionnalité nous a donc permis de quantifier la diminution des débits annuels moyens en aval de certains barrages caractérisés par un régime d'Inversion en période de sécheresse. C'est ainsi que nous avons observé des réductions des débits minimums moyens annuels parfois supérieures à 50% en aval de certains réservoirs. Cette réduction est même supérieure à celle provoquée par les transferts inter-bassins d'eau au Québec.

En effet, la dérivation des eaux de rivières Koksoak et Caniaspicau, par exemple, a provoqué une diminution des débits moyens annuels respectivement de 35% et 48 % après leur détournement vers le bassin versant de La Grande. Des réductions de débits encore plus importantes ont affecté les rivières Opinaca (87%) et Eastmain (90%) après leur détournement vers le même bassin (HAYEUR 2001). Il convient cependant de noter que contrairement aux dérivations dont les effets restent permanents, la réduction des débits observés en aval des réservoirs est temporaire et ne dure qu'une année.

En ce qui concerne les facteurs qui influencent l'ampleur des modifications des débits induites par les barrages, cinq facteurs ont été répertoriés (ASSANI *et al.* 2005a, 2005b; BATALLA *et al.* 2004; DYNESIUS et NILSSON 1994) :

- Le mode de gestion des barrages. Il dépend des objectifs assignés à ceux-ci. Ainsi par exemple, un barrage-réservoir ne provoque pas les mêmes modifications hydrologiques qu'une centrale hydroélectrique destinée simplement à produire l'énergie électrique. De même un barrage destiné à produire seulement de l'électricité ne fonctionnera pas de la même façon qu'un barrage destiné à la fois à la production de l'énergie électrique et à l'irrigation ou encore un barrage destiné à fournir de l'eau à une agglomération.
- La taille du bassin versant. Elle détermine la dimension des barrages et/ou son mode de gestion. Un réservoir construit sur un grand cours d'eau peut ou ne pas provoquer les mêmes effets qu'un réservoir érigé sur un petit cours d'eau.
- Le nombre des barrages construits sur un même cours d'eau. On peut aisément concevoir que les impacts hydrologiques seront beaucoup moins importants sur une rivière avec un seul barrage que sur une rivière de même taille avec de nombreux barrages.

- L'âge des barrages. En raison de l'émergence de la conscience environnementale depuis 1970, les impacts hydrologiques des barrages tendent à être atténués. On peut ainsi concevoir que les barrages construits récemment sont susceptibles de causer moins d'impacts hydrologiques que les barrages anciens parce qu'on ne tenait pas compte des préoccupations environnementales lors de constructions des barrages avant 1970 au Québec (HAYEUR 2001).
- Le climat. Le climat détermine le régime hydrologique des rivières d'une part, et le taux de l'évapotranspiration, d'autre part. Les impacts hydrologiques d'un barrage destiné à la production de l'énergie électrique en saison froide peuvent significativement être différents dans un climat tempéré océanique caractérisé par des hivers doux et pluvieux que dans un climat tempéré froid caractérisé par des hivers rigoureux et secs. De même, un réservoir en climat sec et chaud sera soumis à une forte évapotranspiration qu'un réservoir en climat tempéré et pluvieux.

La connaissance de l'influence de chacun de ces cinq facteurs sur l'ampleur des modifications hydrologiques est très primordiale dans la gestion des ressources hydriques ainsi que dans l'élaboration des mesures de restauration et de conservation des tronçons régularisés. Par ailleurs, dans le cadre de la problématique actuelle sur la destruction des barrages, cette connaissance est très importante pour décider quels sont les types de barrages les plus nuisibles à l'environnement qu'il faut détruire. Or, comme l'ont souligné récemment POFF et HART (2002), on ne dispose d'aucune connaissance sur l'influence de ces facteurs. Ce qui rend la gestion des barrages et la conservation comme la protection des ressources naturelles dans les tronçons régularisés très aléatoire. Ainsi, il n'existe aucune classification des barrages en fonction de leurs impacts hydrologiques et écologiques. La seule classification utilisée dans le monde est basée

seulement sur la taille des ouvrages. Ce qui n'apporte aucune information pertinente sur leurs impacts hydrologiques et écologiques. Selon nous, ce fait est dû seulement à cause des méthodes couramment utilisées dans la littérature scientifique. Comme nous l'avons déjà mentionné, ces trois méthodes ne permettent pas de déterminer l'influence de chacun de ces cinq facteurs sur l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages du fait qu'elles consistent à analyser séparément les stations. Pour mettre en évidence l'influence de ces facteurs, il faut analyser simultanément toutes les stations comme c'est le cas avec la méthode de proportionnalité utilisée dans ce travail. Ainsi, grâce à celle-ci, nous avons pu déterminer l'influence de deux facteurs sur les débits moyens annuels au Québec, à savoir le mode de gestion et la taille des bassins versants. En ce qui concerne le mode de gestion, nous avons démontré que les modifications hydrologiques affectent surtout les barrages caractérisés par le régime d'Inversion. Ces modifications se traduisent par une baisse du volume d'écoulement pendant les années hydrologiques sèches et d'une forte variabilité inter-annuelle des débits ainsi que, dans une moindre mesure, de la baisse des valeurs des coefficients d'asymétrie et de la hausse des valeurs des coefficients d'aplatissement. Quant au régime d'Homogénéisation, les modifications induites par les barrages affectent seulement les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Enfin, le régime de Type naturel est le moins modifié par les barrages. Ces résultats confirment ceux déjà observés aux échelles mensuelles et journalières (tableau 2.3). Le tableau 2.3 révèle que les modifications hydrologiques induites par les barrages affectent surtout le régime d'Inversion au Québec. Rappelons que ce régime est exclusivement associé aux réservoirs (ASSANI *et al.* 2004). Ces barrages sont destinés généralement à alimenter en eau les centrales hydroélectriques situées en aval pendant la période hivernale et pour prévenir les inondations au printemps au moment de la fonte des neiges. Ainsi, au printemps (avril et mai), on stocke l'eau provenant de la fonte des neiges pour reconstituer les réserves d'eau qui seront utilisées en hiver.

Le régime de type Inversion est un régime rarement observé dans le monde. Mais, au Québec, il représente plus du tiers des barrages hydroélectriques en raison d'un climat particulièrement froid en hiver. Ce qui nécessite un stockage important d'eau au printemps pour produire davantage de l'énergie hydroélectrique en hiver. Mais lorsque la taille des bassins versants augmente ou les réservoirs sont couplés aux centrales hydroélectriques, la quantité d'eau stockée au printemps diminue. On passe ainsi au régime dit « d'Homogénéisation ». Celui-ci se distingue fondamentalement du régime d'Inversion par l'absence d'occurrence des débits minimums mensuels au printemps au moment de la fonte des neiges. Cette absence peut ainsi atténuer les impacts de barrages sur les écosystèmes aquatiques et riverains. Au Québec, ce type de régime correspond souvent aux barrages-réservoirs dotés de centrales hydroélectriques pour produire de l'énergie hydroélectrique durant toute l'année. En hiver, l'eau est turbinée pour produire de l'énergie électrique. Au printemps, on stocke une partie de l'eau de fonte et une autre partie sert à produire de l'énergie. Ces barrages sont généralement construits sur de grands cours d'eau qui possèdent des débits relativement importants. Ce qui ne nécessite pas un stockage important d'eau de fonte au printemps comme c'est le cas des barrages-réservoirs. Le régime d'Homogénéisation est le régime le plus couramment observé en climat tempéré continental ou de montagne en raison d'un hiver relativement froid nécessitant une forte production de l'énergie électrique pour le chauffage (ANDREWS et PIZZI 2000 ; LECONTE *et al.* 2001 ; MAHESHWARI *et al.* 1995 ; MERRIT et COOPER 2000 ; REILY et JOHNSON 1982). L'eau stockée au printemps peut servir aussi à l'irrigation ou à la climatisation en été. Quant au régime du Type naturel, il est associé le plus souvent aux barrages construits au fil de l'eau et qui sont presque tous dotés des centrales hydroélectriques pour produire de l'énergie. La plupart de ces barrages ne disposent donc pas des réservoirs. En hiver, ils sont alimentés directement par les barrages-réservoirs situés généralement en amont. Au printemps, au moment du stockage des

eaux dans les barrages-réservoirs, ils sont directement alimentés par les eaux de fonte de neiges. Pendant cette période, la production de l'énergie baisse en raison du réchauffement de la température. Toutefois, certains barrages de cette catégorie servent à lutter contre les inondations. Ils peuvent ainsi stocker assez d'eau au printemps sans pour autant entraîner une inversion du cycle naturel des débits.

L'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages dépend aussi de la taille des bassins versants. À l'échelle annuelle, cette influence de la taille des bassins versants a été surtout manifeste en régime d'Homogénéisation. Ainsi, nous avons observé une hausse des coefficients d'asymétrie pour les rivières de taille supérieure à 10 000 km² mais une baisse pour les bassins versants de taille comprise entre 5 000 et 10 000 km². Quant aux rivières de taille inférieure à 5 000 km², aucun changement n'a été observé. L'influence de la taille des bassins versants a été surtout observée aux échelles mensuelles et journalières au Québec (tableau 2.4).

Enfin, toutes les variables hydrologiques des débits ne sont pas modifiées de la même façon par les barrages. Nous venons de démontrer qu'à l'échelle annuelle, en ce qui concerne la caractéristique volume d'écoulement-fréquence, les valeurs maximums des moyens annuels ne sont pas modifiées par les barrages alors que les valeurs minimums le sont en régime d'Inversion. En régime d'Homogénéisation, seuls les coefficients d'asymétrie sont modifiés par les barrages. La prise en compte de toutes les caractéristiques des débits à l'échelle annuelle nous a permis de mettre en évidence l'influence des barrages sur les débits moyens annuels au Québec. Beaucoup de travaux portant sur les débits moyens annuels se limitent souvent à l'analyse d'une seule caractéristique, à savoir la moyenne des débits moyens annuels (CHURCH 1995; LOIZEAU et DOMINIK 2000; VIVIAN 1994; WEINGARTNER et ASCHWANDEN 1994). Comme

l'avaient déjà souligné RICHTER *et al.* (1996) notamment, cette approche est insuffisante sur le plan écologique du fait qu'elle ne peut rendre compte de toutes les modifications écologiques induites par un barrage. En effet, selon le nouveau concept du « régime des débits naturels », chaque caractéristique des débits joue un rôle précis dans le fonctionnement d'un écosystème aquatique (tableau 2.5). Toute modification qui affecte une seule de ces caractéristiques peut entraîner des changements plus ou moins profonds de ce fonctionnement. Il est donc impératif de tenir compte de toutes les caractéristiques de débits dans les études d'impacts hydrologiques de barrages. Ceci se justifie par le fait que certaines caractéristiques peuvent être plus modifiées que d'autres par les barrages. L'identification des caractéristiques modifiées permet d'apporter des solutions concrètes et précises pour restaurer les tronçons régularisés. À ce propos, le changement le plus important mis en évidence dans ce travail est sans nul doute la diminution du volume d'écoulement des débits moyens annuels pendant les années sèches et la forte variabilité inter-annuelle des débits en régime d'Inversion. L'analyse détaillée des débits en amont et en aval du réservoir Taureau construit sur la rivière Mattawin, caractérisé par un régime d'Inversion, ainsi que les observations de terrain effectuées entre 2002 et 2005 sur la même rivière, permet d'expliquer aisément cette baisse et cette variabilité (ASSANI *et al.* 2002). En effet, durant les années sèches, on stocke davantage de l'eau dans le réservoir afin d'éviter toute pénurie en hiver pour la production de l'énergie électrique. Ainsi, au printemps et en été, on lâche très peu d'eau en aval du réservoir provoquant une diminution significative des débits printaniers et estivaux. Comme le révèle la figure 2.9, au mois de mai par exemple, les débits moyens mensuels minimums en aval des barrages sont beaucoup plus faibles qu'en rivières naturelles. C'est le cas observé en aval du réservoir Taureau en 2003, qui fut une année particulièrement sèche. Durant cette année, le débit était quasi nul entre avril et juillet au point que le lit de la rivière était presque à sec à de nombreux endroits permettant à la végétation d'envahir le lit mineur même

(GRAVEL 2005). En revanche, durant les années hydrologiques humides et normales, le stockage de l'eau dans les réservoirs est limité. Ainsi, les impacts sur les débits moyens annuels sont fortement atténués malgré l'écèlement des crues observées en hiver. C'est le cas de l'année 2004 qui fut plus humide que la normale. Le niveau d'eau en aval du réservoir Taureau était comparable à celui des rivières naturelles entre avril et juillet. Si le mode de gestion est la principale cause de la baisse des débits moyens annuels en période de sécheresse, on ne peut négliger l'influence des conditions climatiques. En effet, les années sèches sont caractérisées par des longues périodes d'ensoleillement, des températures de l'air relativement élevées et d'un faible taux d'humidité de l'air. Ces conditions climatiques peuvent donc favoriser une forte évaporation de l'eau stockée dans les réservoirs au printemps et en été contribuant ainsi à une diminution des débits moyens annuels pendant les années hydrologiques sèches.

En conclusion, contrairement à l'opinion couramment admise, les barrages modifient toutes les caractéristiques des débits moyens annuels au Québec. Mais l'ampleur de cette modification hydrologique dépend du mode de gestion des barrages, de la taille des bassins versants et de la variable hydrologique analysée. Ces trois facteurs doivent être pris en compte dans l'élaboration des mesures de restauration et de conservation des écosystèmes de tronçons régularisés au Québec parce que leur influence a été mise en évidence à toutes les échelles temporelles (année, saison, mois, jour) dans le cadre de nos travaux (ASSANI 2004; ASSANI *et al.* 2004, 2005a, 2005b, LAJOIE *et al.* 2005).

BIBLIOGRAPHIE

- ANCTIL F., COULIBALY P., 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec streamflow. *J. climate*. **17**, 163-173.
- ANDREWS E.D., PIZZI A.L., 2000. Origin of Colorado River experimental flood in Grand Canyon. *Hydrol. Sc. J.* **45**, 607-627.
- ASSANI A.A., PETIT F., MABILLE G., 1999. Analyse des débits de la Warche aux barrages de Butgenbach et de Robertville (Ardenne belge). *Bull. Soc. Géogr. Liège*. **36**, 17-30.
- ASSANI A.A., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., 2002. Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Rev. Sci. Eau*. **15**, 557-574.
- ASSANI A.A., 2003. Nouvelle théorie de régionalisation des débits : la théorie éco-géographique. Notes de recherche no 01/03, Laboratoire d'hydro-climatologie et de géomorphologie fluviale, UQTR, 10p.
- ASSANI A.A., 2004. Comparaison de la variabilité inter-annuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière Saint-Maurice (Québec, Canada). *Bull. Soc. Géogr. Liège*. **44**, 87-96.
- ASSANI A.A., GRAVEL E., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., 2004. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques des rivières régularisées au Québec. Application de l'approche écologique. Submitted to *Can. Water Res. J.*
- ASSANI A.A., GRAVEL E., BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., 2005a. Impacts des barrages sur les débits minimums annuels en fonction des régimes hydrologiques artificialisés. *Rev. Sci. Eau*. **18**, 103-127.

- ASSANI A.A., STICHELBOU E., ROY A.G., PETIT F., 2005b. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in the three regulated hydrologic regimes in Québec. *Hydrol. Process.* (Accepté moyennant des corrections très mineures).
- BATALLA R.M., GOMEZ C.M., KONDOLF G.M., 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *J. Hydrol.* **290**, 117-136.
- BELZILE L., BÉRUBÉ P., HOANG V.D., LECLERC M., 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Report submitted by INRS-Eau and Groupe-conseil Génivar inc. to the Ministère de l'Environnement et de la Faune and Fisheries and Oceans Canada. 83 p + 8 annexes.
- BENN P.C., ERSKINE W.D., 1994. Complex channel response to flow regulation : Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. *Appl. Geogr.* **14**, 153-168.
- BIGGS B.J.F., TUCHMAN N.C., LOWE R.L., STEVENSON R.J., 1999. Resource stress alters hydrological disturbance effects in a stream periphyton community. *Oikos*. **85**, 95-108.
- BIGGS B.J.F., VLADIMIR I.N., SNELDER T.H., 2005. Linking scales of flow variability to lotic ecosystems structure and function. *River Res. Applic.* **21**, 283-298.
- CHURCH M., 1995. Geomorphic response to river flow regulation: case studies and time-scales. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* **11**, 3-22.
- DYNESIUS M., NILSSON C., 1994. Fragmentation and flow regulation of rivers systems in the northern third of the world. *Science*. **266**, 753-762.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2000), CD-ROM HYDAT.
- ERSKINE W.D., TERRAZZOLO N., WARNER R.F., 1999. River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of large hydro-electric power project: Snowy River, Australia. *Regul. Rivers: Res. & Mgmt.* **15**, 3-24.

GRAVEL É., 2005. Effets de la hausse des débits sur les paramètres physico-chimiques de l'eau et des sédiments ainsi que sur la richesse spécifique de la végétation du lit mineur en aval du réservoir Taureau sur la rivière Matawin (Québec). Congrès annuel de l'ACG, London (Ontario), juin 2005 (résumé).

HAYES J.W., 1995. Spatial and temporal variation in the relative density and size of juvenile brown trout in the Kakanui River, North Otago, New Zealand. *N. Z. J. M. Freshw. Resh.* **29**, 393-408.

HAYEUR G., 2001. Synthèse des connaissances environnementales acquises en milieu nordique de 1970 à 2000. Montréal, Hydro-Québec, 110 p

HUDON C., 1997. Impact of water level fluctuation on St. Lawrence river aquatic vegetation. *Can. J. Fish. Aquat. Sc.* **54**, 2853-2865.

HUDON C. 2004. Shift in wetland plant composition and biomass following low-level episodes in the St. Lawrence river : looking into the future. *Can. J. Fish. Aquat. Sc.* **61**, 603-617.

LAJOIE F., ASSANI A.A., ROY A.G., MESFIOUI M., 2005. Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size. *Water Resourc. Res.* (Submitted)

LECONTE R., PIETRONIRO A., PETERS D.L., PROWSE T.D., 2001. Effects of flow regulation on hydrologic patterns of large, inland delta. *Regul. Rivers : Res. & Mgmt.* **17**, 51-65.

LOIZEAU J.L., DOMINIK J., 2000. Evolution of the Upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for lake Geneva. *Aquat. Sci.* **62**, 54-67.

MAHESHWARI B.L., WALKER K.F., MCMAHON A., 1995. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regul. Rivers : Res. & Mgmt.* **10**, 15-38.

MCINTOCH A.R., 2000. Habitat and size-related variations in exotic trout impacts on native galaxiid fishes in New Zealand., *Can. J. Fish. Aquat. Sc.* **57**, 2140-2151.

- MERRITT D.M., COOPER D.J., 2000. Riparian vegetation and channel change in response to river regulation : a comparative study of regulated and unregulated streams in the Green River basin, USA. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* **16**, 543-564.
- PETERS D.L., PROWSE T., 2001. Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrol. Process.* **15**, 3181-3194.
- POFF N.L., ALLAN J.D., BAIN M.B., KARR J.R., PRESTEGAARD K.L., RICHTER B.D., SPARKS R.E., STROMBERG J.C., 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience.* **47**, 769-784.
- POFF N.L., HART D.D., 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience.* **25**, 659-668.
- REILY P.W., JOHNSON W.C., 1982. The effects of altered hydrologic regime on tree growth along the Missouri River in North Dakota. *Can. J. Bot.* **60**, 2410-2423.
- RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., POWELL J., BRAUN D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conserv. Biol.* **10**, 1163-1174.
- RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P., 1997. How much water does a river need? *Freshw. Biol.* **37**, 231-249.
- VIVIAN H. 1994. L'hydrologie artificialisée de l'Isère en amont de Grenoble. Essai de quantification des impacts des aménagements. *Rev. Géogr. Alpine.* **2**, 97-112.
- WEINGARTNER R., ASCHWANDEN H., 1994. Quantification des débits des cours d'eau des Alpes suisses et des influences anthropiques qui les affectent. *Rev. Géogr. Alpine.* **2**, 45-58.

Tableau 2.1. Les caractéristiques et les variables statistiques des débits moyens annuels.

Table 2.1. Mean annual characteristics flows and hydrological variables.

Caractéristiques	Variables hydrologiques	Signification et mode de calcul
Volume d'écoulement et Fréquence	Débits maximums (Dmax)	La valeur des débits moyens annuels la plus élevée
	P95	Valeur des débits moyens annuels correspondant au percentile 95
	P90	Valeur des débits moyens annuels correspondant au percentile 90
	Mo	Moyenne arithmétique des débits moyens annuels (MDMA)
	P10	Valeur des débits moyens annuels correspondant au percentile 10
	P5	Valeur des débits moyens annuels correspondant au percentile 5
	Débits minimums (Dmin)	La valeur des débits moyens annuels la plus faible
Variabilité inter-annuelle	CV	Coefficient de variation
Forme de la courbe	CAS	Coefficient d'asymétrie
	CAP	Coefficient d'aplatissement

Tableau 2.2. Comparaison des paramètres de régression. Résultats de l'analyse de variance (test de parallélisme).

Table 2.2. Comparison of regression parameters. Results of analysis of variance.

Variables hydrologiques		Inversion (2, 97)	Homogénéisation (2, 88)	Type naturel (2, 92)
Qmax	F	0,15	0,69	0,12
	Pr > F	0,8598	0,5044	0,8842
P95	F	0,86	1,45	0,25
	Pr > F	0,4254	0,2398	0,7805
P90	F	1,31	1,22	0,35
	Pr > F	0,2748	0,3013	0,7037
MDMA	F	2,24	0,55	0,63
	Pr > F	0,1125	0,5818	0,5363
P10	F	4,24	0,53	0,40
	Pr > F	0,0172*	0,5907	0,6707
P5	F	4,92	0,63	0,76
	Pr > F	0,0092*	0,5347	0,4685
Qmin	F	7,25	1,79	1,77
	Pr > F	0,0012*	0,1729	0,1769

* : différence significative ; (a,b) = nombre de degrés de liberté pour le test F. Pr > F : seuil de signification. Les valeurs statistiquement significatives apparaissent en gras.

Tableau 2.3. Comparaison d'impacts de barrages en fonction de leurs modes de gestion aux échelles annuelles, mensuelles et journalières au Québec.

Table 2.3. Comparison of dams impacts according the management mode at annual, monthly and daily scales.

Caractéristiques	Échelle annuelle			Échelle mensuelle*			Échelle journalière**		
	RI	RH	RTN	RI	RH	RTN	RI	RH	RTN
VE-Fréquence	X			X	X		X	X	X
Variabilité du VE	X			X			X	X	
PO				X	X		X	X	
Variabilité de la PO				X	X		X		
CAS	X	X	X	X	X		X	X	
CAP	X	X	X	X	X		X	X	

RI = régime d'Inversion ; RH = Régime d'Homogénéisation ; RTN = régime de Type naturel ; VE = volume d'écoulement ; PO = période d'occurrence des débits maximums et minimums; CAS = coefficient d'asymétrie ; CAP = coefficient d'aplatissement ; X = changement de la caractéristique des débits. * : source : LAJOIE et al., 2005 ; ** : source : ASSANI et al. (2005a, 2005b).

Tableau 2.4. Comparaison d'impacts des barrages en fonction de la taille des bassins versants au Québec. Cas du régime d'Inversion.

Table 2.4. Comparison of dams impacts according the watershed size in Québec. Case of Inversed regime.

Caractéristiques	Échelle annuelle		Échelle mensuelle		Échelle journalière (Maximums)		Échelle journalière (Minimums)	
	<10000 km ²	>10000 km ²	<10000 km ²	>10000 km ²	<10000 km ²	>10000 km ²	<10000 km ²	>10000 km ²
VE-fréquence	-	-	+ et --	++ et -	+	++	--	-
Variabilité de VE	+	+	++	+ et -		+	++	+
PO			C	C	C	C	C	C
Variabilité de PO				++ et --		+		+
CAS	?+	?-	+ et -	++ et --		+		+
CAP	+	+	+	++		+		+

RI = régime d'Inversion ; RH = Régime d'Homogénéisation ; RTN = régime de Type naturel ; VE = volume d'écoulement ; PO = période d'occurrence des débits maximums et minimums; CAS = coefficient d'asymétrie ; CAP = coefficient d'aplatissement ; X = changement de la caractéristique des débits. C = changement ; + : hausse de la caractéristique des débits; - : baisse de la caractéristique des débits; ++ ou -- : hausse ou baisse plus importante que l'autre catégorie des bassins versants ; * : source : LAJOIE et al., 2005 ; ** : source : ASSANI et al. (2005a, 2005b). À l'échelle mensuelle, nous avons observé la hausse pour certains mois et la baisse pour d'autres mois.

Tableau 2.5. Les cinq caractéristiques fondamentales et leurs rôles écologiques (RICHTER et al., 1996).

Table 2.5. The five flow characteristics and their ecological roles (RICHTER et al., 1996).

Caractéristiques	Exemples des rôles écologiques
Magnitude	Mesure du volume d'habitats disponible pour les espèces aquatiques ou semi-aquatiques. Mesure de la position de la nappe par rapport aux systèmes racinaires de la végétation riparienne.
Période d'occurrence	Peut déterminer si certains cycles vitaux seront satisfaits ou non et peut influencer le degré de stress associé aux conditions extrêmes telles les inondations ou les sécheresses.
Fréquence	Peut être reliée à la reproduction et à la mortalité des espèces, influençant ainsi la dynamique des populations.
Durée	Peut déterminer si des phases particulières des cycles vitaux peuvent être complétées ou non. Peut affecter le degré de stress associé aux événements extrêmes comme les inondations ou les sécheresses.
Variabilité	Indique la variabilité du volume d'habitats disponibles et peut influencer la capacité de la végétation à maintenir un contact avec la nappe phréatique.

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Les caractéristiques et les variables statistiques des débits moyens annuels.

Table 2.1. Mean annual characteristics and hydrological variables.

Tableau 2.2. Comparaison des paramètres de régression. Résultats de l'analyse de variance (test de parallélisme).

Table 2.2. Comparison of regression parameters. Results of analysis of variance.

Tableau 2.3. Comparaison d'impacts de barrages en fonction de leurs modes de gestion aux échelles annuelles, mensuelles et journalières au Québec.

Table 2.3. Comparison of dams impacts according the management mode at annual, monthly and daily scales.

Tableau 2.4. Comparaison d'impacts des barrages en fonction de la taille des bassins versants au Québec. Cas du régime d'Inversion.

Table 2.4. Comparison of dams impacts according the watershed size in Québec. Case of Inversed regime.

Tableau 2.5. Les cinq caractéristiques fondamentales et leurs rôles écologiques (RICHTER et al., 1996).

Table 2.5. The five flow characteristics and their ecological roles (RICHTER et al., 1996).

Liste des figures

Figure 2.1. Localisation des stations.

Figure 2.1. Location of stations.

Figure 2.2. Relation entre nombre d'années et (a) moyennes arithmétiques des débits moyens annuels et (b) coefficients de variation des débits moyens annuels en rivières naturelles (RN).

Figure 2.2. Relationship between number of years and (a) mean and (b) coefficients of variation of MAF in pristine rivers.

Figure 2.3. Comparaison de la moyenne arithmétique des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).

Figure 2.3. Comparison of arithmetic mean of MAF magnitude-frequency between regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR).

Figure 2.4. Comparaison des valeurs maximales des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).

Figure 2.4. Comparison of maxima values of MAF magnitude between regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR).

Figure 2.5. Comparaison des valeurs minimales des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).

Figure 2.5. Comparison of minima values of MAF magnitude between regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR).

Figure 2.6. Comparaison des coefficients de variation des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).

Figure 2.6. Comparison of coefficients of variation between regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR).

Figure 2.7. Comparaison des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des courbes de distribution des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).

Figure 2.7. Comparison of coefficients of skewness between regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR).

Figure 2.8. Comparaison des coefficients d'aplatissement des courbes de distribution des débits moyens annuels entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR).

Figure 2.8. Comparison of coefficients of kurtosis between regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR).

Figure 2.9. Comparaison des débits moyens mensuels minimums entre les rivières naturelles (cercles, RN) et les rivières régularisées (triangles, RR) au mois de mai en régime d'Inversion.

Figure 2.9. Comparison of minima monthly flow between Inversed regulated (triangles, RR) and unregulated rivers (circles, NR) in May.

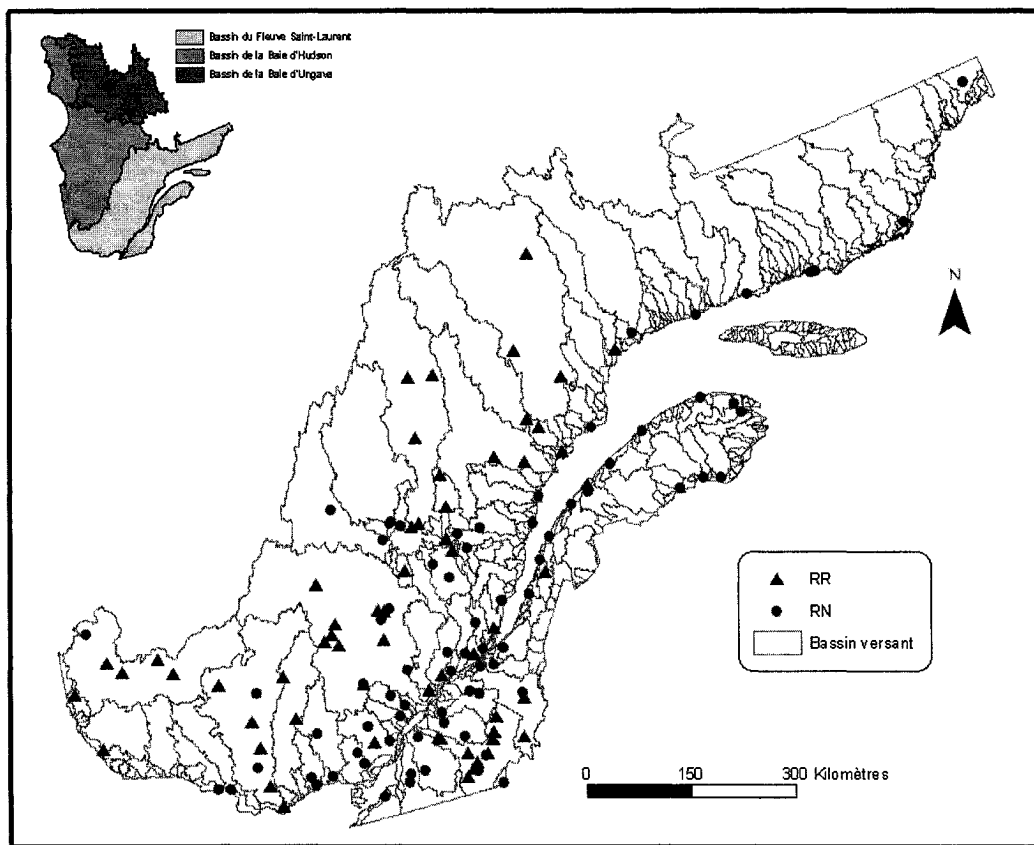


Figure 2.1

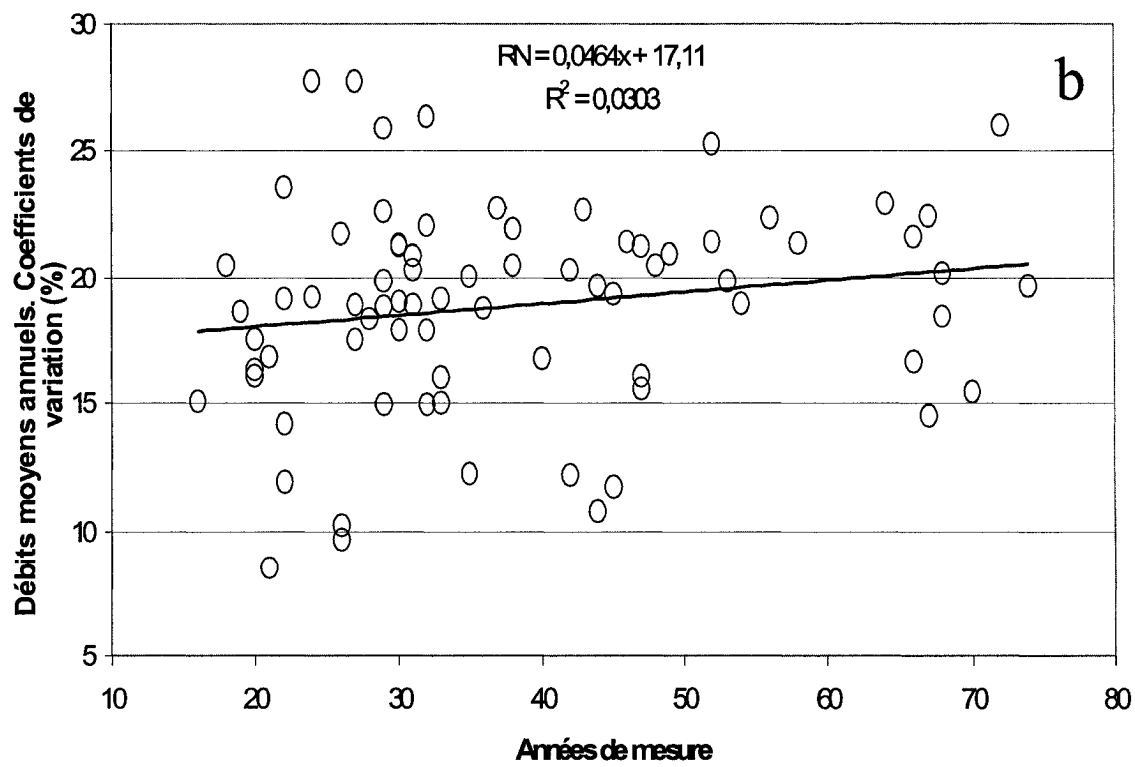
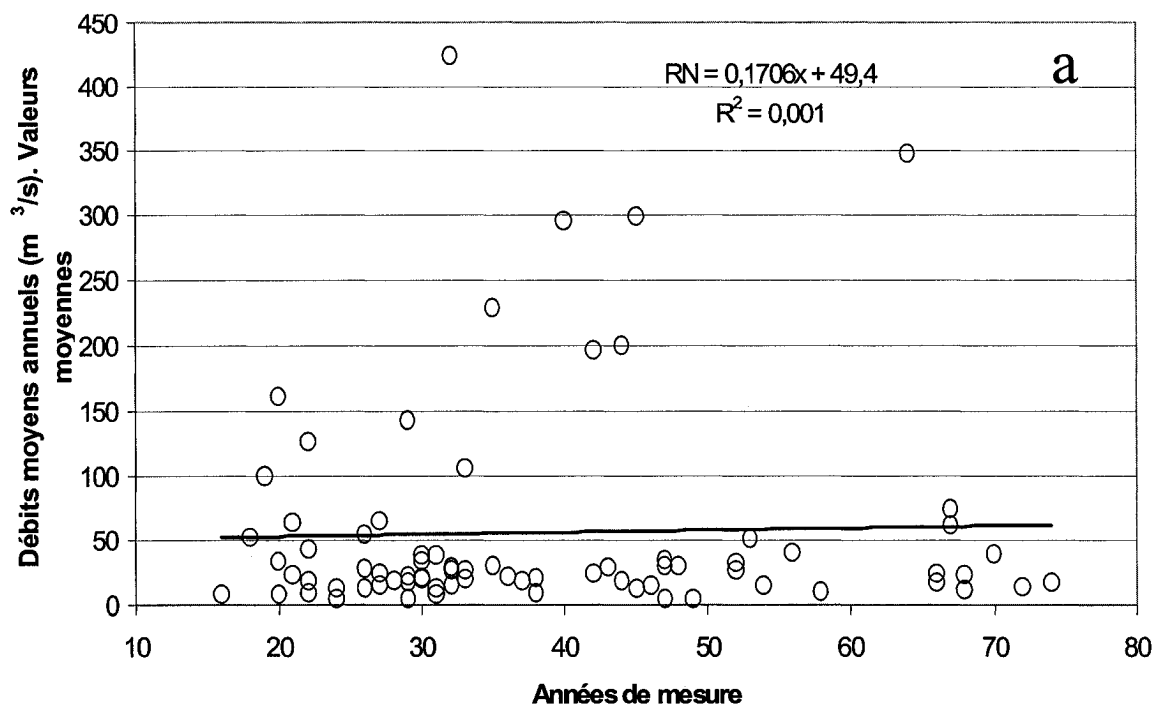


Figure 2.2

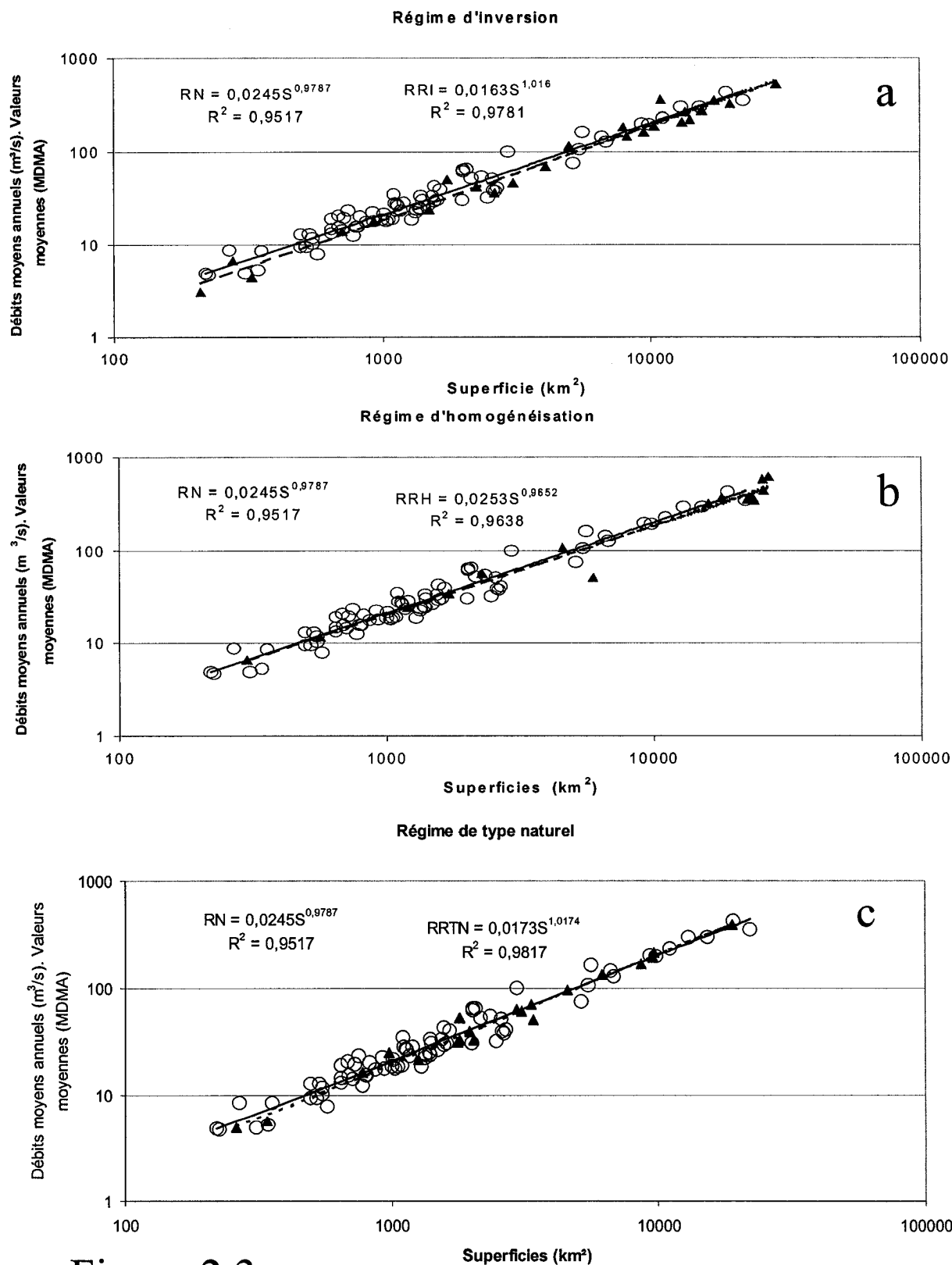


Figure 2.3

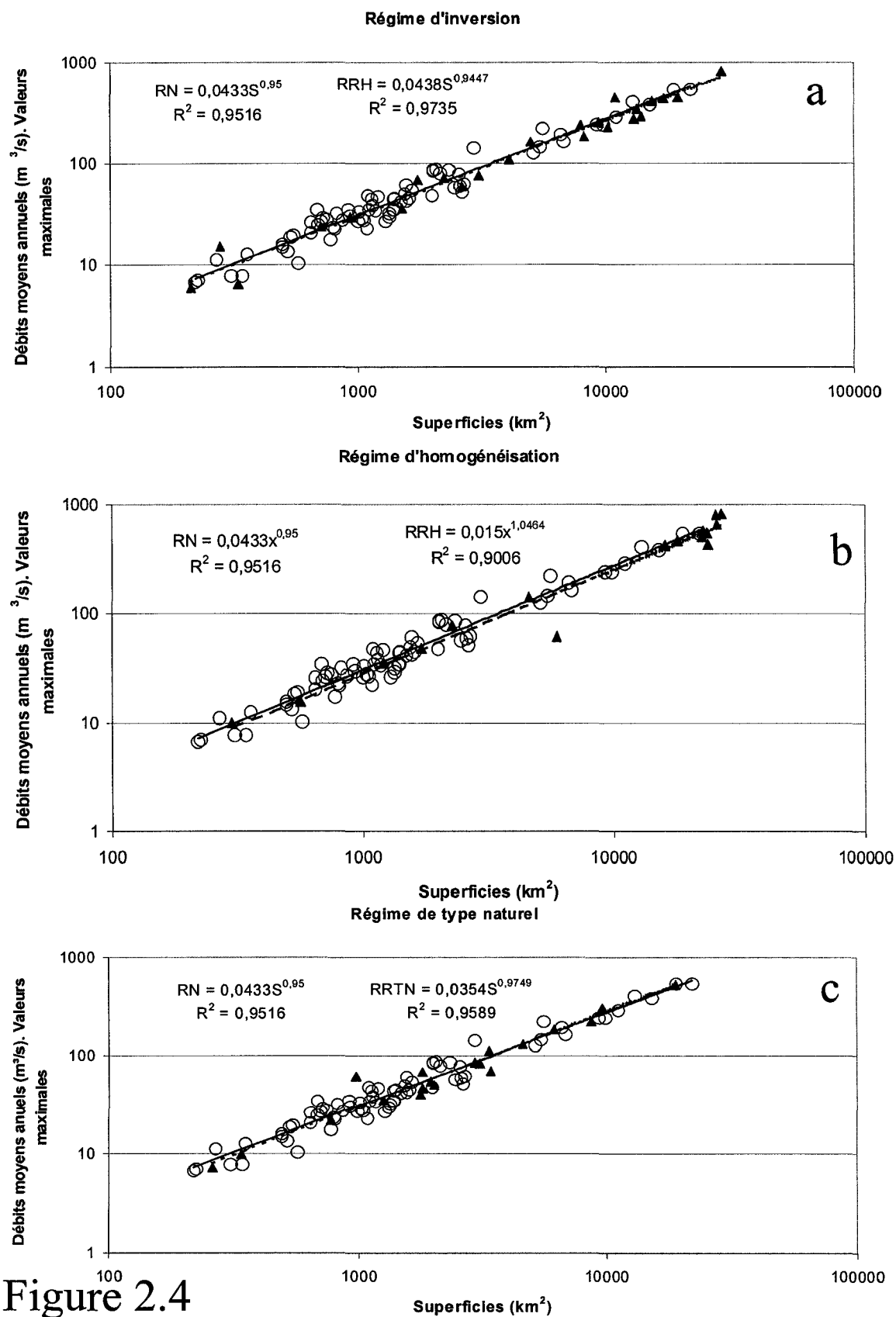


Figure 2.4

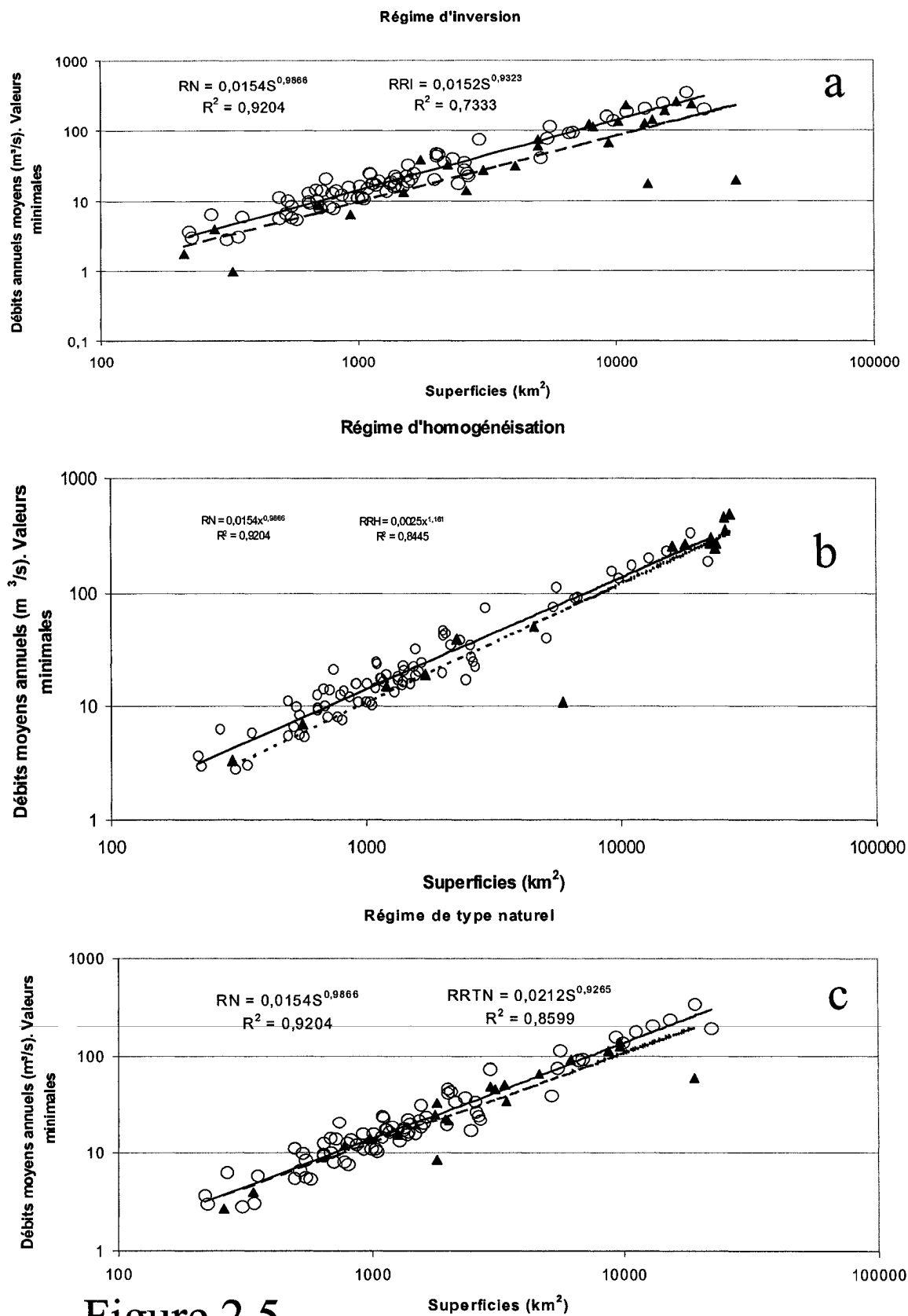


Figure 2.5

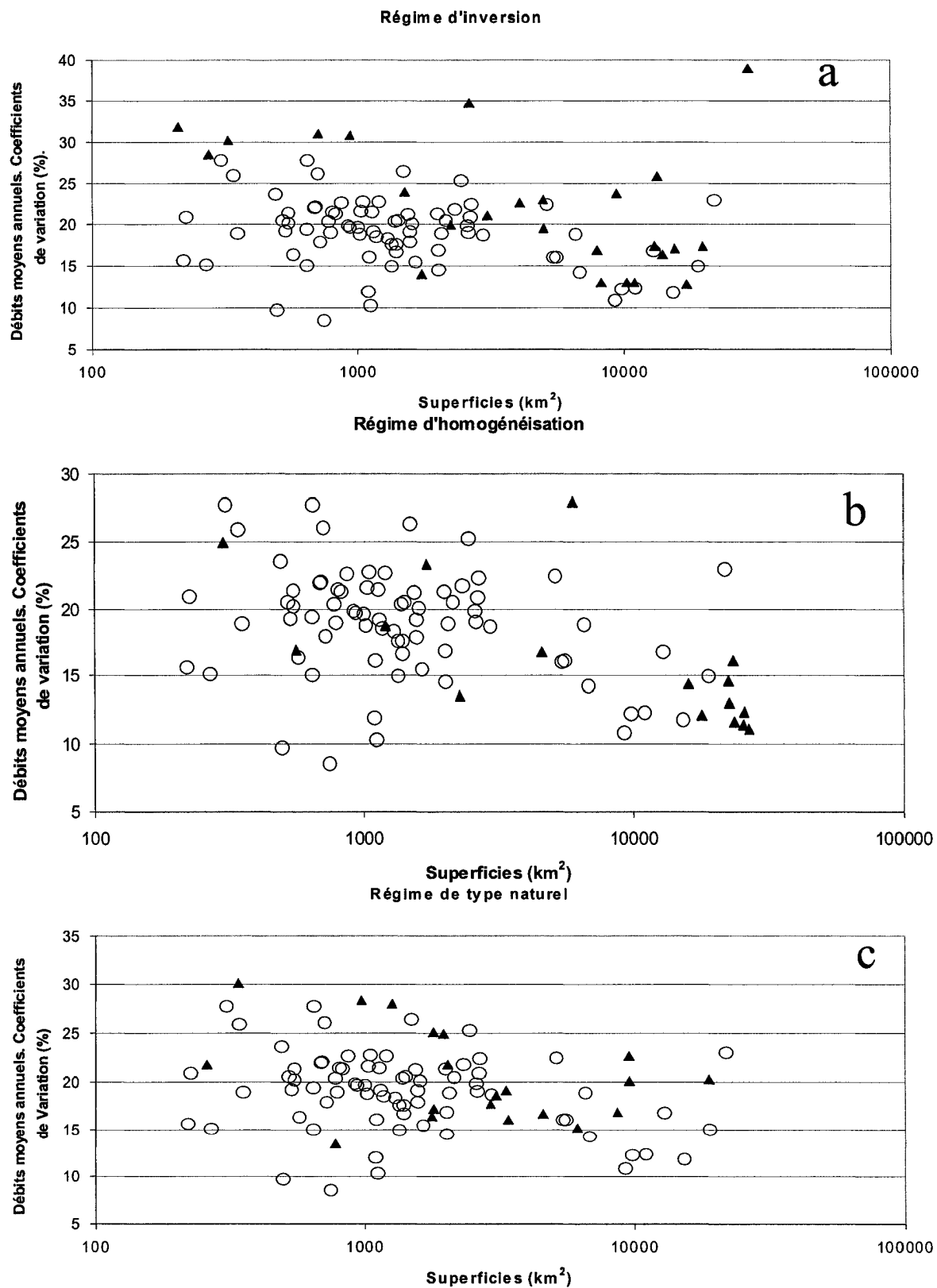


Figure 2.6

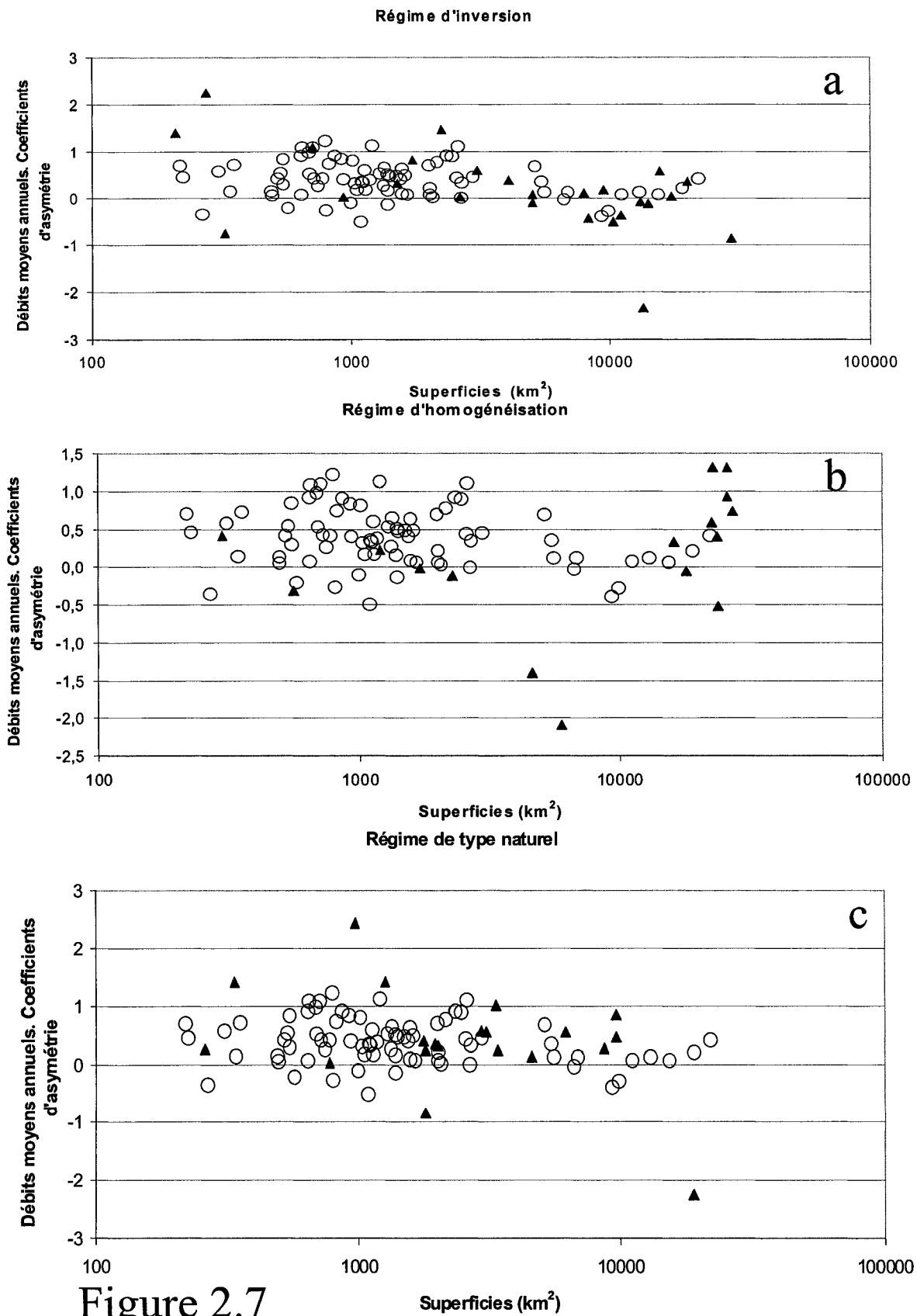


Figure 2.7

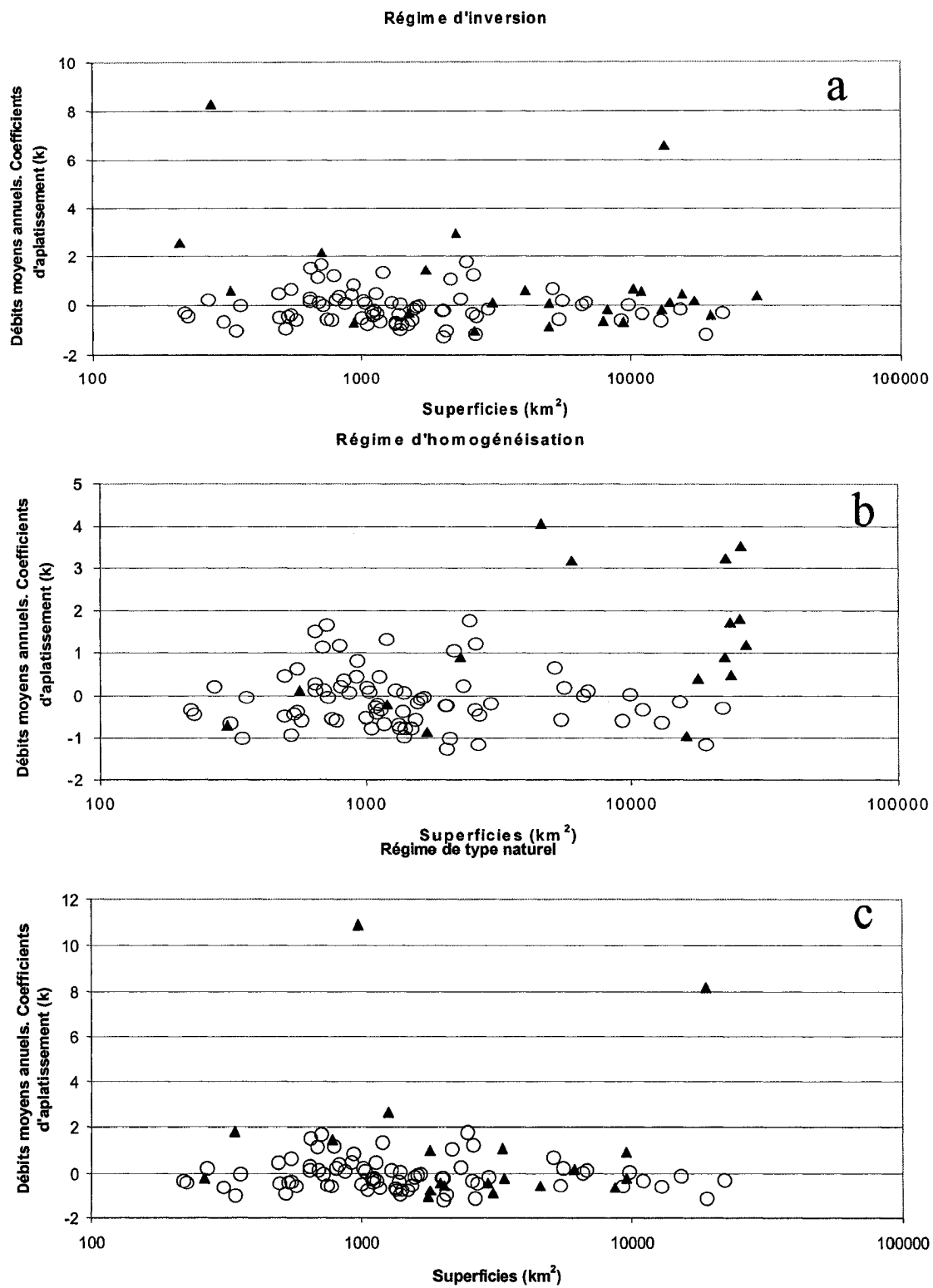


Figure 2.8

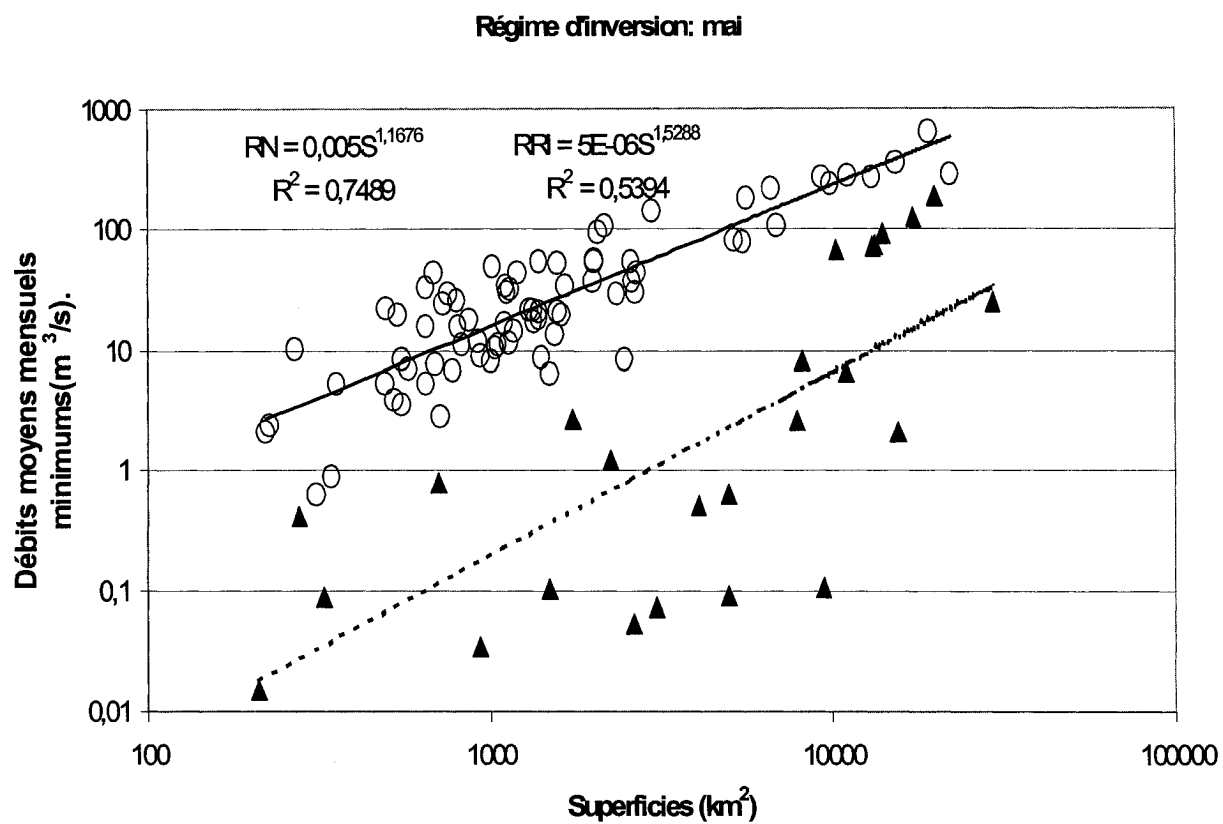


Figure 2.9

CHAPITRE 3

Article soumis au Water Resources Research

IMPACTS OF DAMS ON MONTHLY FLOW CHARACTERISTICS. THE INFLUENCE OF WATERSHED SIZE.

Francis LAJOIE¹, Ali A. ASSANI¹, André G. ROY² and Mhamed MESFIOUI³

¹ Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale (Hydroclimatology and River Geomorphology Laboratory), Geography Section, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

² Chaire de recherche du Canada en dynamique fluviale, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, Succursale centre-ville, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada.

³ Département de Mathématiques et d'Informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Mailing address

Ali A. ASSANI

Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, Section de Géographie (Geography Section), Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tel.: (819) 376-5011; Fax: 376-5179; Email: Ali.Assani@uqtr.ca

SUMMARY

We have compared the monthly flow characteristics between natural rivers (76 stations) and reservoir-regulated rivers (25 stations) based on watershed size, using regression analysis on the monthly flows observed in Québec. The flow characteristics, defined according to the “natural flows regime” paradigm recently introduced in aquatic ecology, are as follows : the periods of occurrence of the monthly maximum and minimum flows and their interannual variability, the magnitude and its interannual variability, the frequency, and the coefficients of skewness and kurtosis. This study revealed that dams alter all monthly flow characteristics but the extent of these modifications is variable. This study has also shown that watershed size significantly influences the nature of these changes. The behaviour of large watersheds ($> 10,000$ km²) seems to be different from that of small and medium-sized watersheds. Large watersheds are characterized by a greater variability in the month when maximum monthly discharges occur and a lower inter-annual variability of the period of occurrence of the minimum monthly flows than smaller basins. Concerning the monthly winter flows, large watersheds also exhibit an increase in the magnitude and a smaller variability in between years of discharges.

3.1 INTRODUCTION

The nature and extent of the changes induced by dams on the streamflow regimes depend on the following five factors : the dam management mode, which in turn depends on the purpose of the dam, watershed size, which largely determines the dimensions of the dams, the number of dams built on a river or in the watershed, the age of the dams and the climate [*Batalla et al.*, 2004; *Petts*, 1984]. All studies on the hydrological impacts of dams to date have focused on the influence of dam management modes and/or climate. On the other hand, no study has examined in detail the influence of the other three factors. Thus, it is not known to what extent the size of a watershed can amplify or mitigate the effects induced by a particular management mode of a dam. It is, however, of great importance for an efficient management of dams and of the fluvial ecosystems that the relative influence of all five factors be assessed as well as the interactions between these factors. This knowledge could also be of great use in the process of selecting which dam should be decommissioned [*Poff and Hart*, 2002].

It is quite difficult though to entangle the effects of these factors. For example, analyzing the influence of watershed size runs up against the problem of methodology. Indeed, all the methods commonly used in dam hydrological impact studies do not allow simultaneous analysis of watersheds of different sizes. Consequently, they cannot show the influence of watershed size on the nature and magnitude of the changes in the flow regimes as it is induced by the dams. In the literature, three methods are commonly used to analyze the hydrological impacts of dams :

- The “monitoring station” method which consists of comparing the data measured at the same station before and after construction of a dam [e.g. *Batalla et al.*, 2004; *Erskine et al.*, 1999; *Richter et al.*, 1997]. This is the method most commonly used in the scientific literature.

- The “control station” method based on the comparison of the flows measured upstream and downstream from a dam [e.g. *Assani et al.*, 2002] or on the comparison of the flows measured on a river not influenced by a dam and downstream from a dam [e.g. *Benn and Erskine*, 1994].
- The “hydrological simulation” method, which consists of comparing the natural flows reconstituted by means of a hydrological model with the flows actually measured at a station. This reconstitution can be based on daily electric power production [*Assani et al.*, 1999] or on a hydrological model [*Maheshwari et al.*, 1995; *Peters and Prowse*, 2001]. The hydrological model allows reconstitution of flows in their natural condition and then compares them with the flows released downstream from a dam. Compared to the other approaches, reconstitution of natural flows by an adequate hydrological model is very laborious, which limits its application.

The objective of this study is to present a method of analysis which makes it possible to determine the influence of watershed size on the hydrological changes induced by hydroelectric dams. This method will be applied to the monthly average flows in Québec where energy production necessitated the construction of numerous hydroelectric dams on many tributaries of the St. Lawrence River watershed. According to *Astrade* [1998], there are nearly 10,000 dams and dikes in the province. Thus, Québec became the world’s third biggest producer of electricity in 1996, since 97% of the electricity available on the provincial network was of hydraulic origin. However, despite the presence of these numerous dams, there are still very few studies of the hydrological impacts induced by these works [*Assani et al.*, 2002; 2005a, 2005b]. It was thus imperative to analyze these impacts in order to determine the exact influence on the streamflow regimes of the dam management mode, the size of the watersheds and the number of dams in a

watershed. The ultimate aim of the study is to propose adequate restoration measures to mitigate the effects of dams on the operation and biodiversity of aquatic ecosystems.

3.2 STATIONS AND DATA ANALYSIS METHOD

Québec is divided into three major watersheds (figure 3.1): the St. Lawrence River watershed (581000 km²) and the watersheds of Ungava Bay (340000 km²) and Hudson Bay (585000 km²). In the course of this study, we will limit ourselves to the Saint-Lawrence watershed where most of the hydroelectric dams are constructed and where data on regulated river flows are available. The flow data analyzed are published in the HYDAT CD-ROM issued by *Environment Canada* [2000]. This CD-ROM indicates the federal number and the name of the station, the annual and monthly average flows, the magnitude and the date of occurrence (day and month) of the maximum and minimum annual flows. It is specified whether the flow values have been corrected to account for the ice effect. Also published are the data on the watershed surface to the right of the measuring station, the geographic coordinates (latitude and longitude), the name of the station manager and the status (natural or regulated) of the water course. It is appropriate to point out that the word “regulated” has been used in its broadest sense, namely reflecting any manmade alteration of the water current. This may involve a simple drainage outlet or construction of dikes on the shores to contain the water in the main channel. Although the duration of the discharge record varies from one watershed to the next, discharge data were collected between 1910 and 2000. We finally selected 76 natural rivers with a watershed size ranging between 100 and 22000 km².

In the case of a station directly influenced by a dam, its name is indicated. This allows us to research the characteristics of each dam on the Ministère de l’Environnement du Québec Web

site (<http://barrages.menv.gouv.qc.ca>, 03-03-2003). On this site, the Ministère publishes four classes of information : identification, administrative class, type of use, and the technical characteristics of each dam. Within the framework of this study, we retained only the stations associated with reservoir dams (Inversed regime) because reservoirs cause the greatest changes to streamflow regimes in Québec [Assani *et al.*, 2005a, 2005b]. In total, 25 stations influenced by reservoirs were analyzed. The duration of the flow records for each station flows is at least ten years. The watersheds analyzed range in size between 100 and 30000 km² (table 3.1).

We thus used a new dam impact analysis method, which consists of comparing the natural river flows and the flows on rivers influenced by dams based on watershed size (proportionality method). This approach is justified by the fact that in natural rivers, there is high proportionality between discharges and watershed areas in Québec [Belzile *et al.*, 1997]. This comparison was based on the log-log relations between monthly discharge and watershed area estimated using the Ordinary Least Squares regression. The difference between the parameters of the regressions was tested through an analysis of variance. However, when it was impossible to apply this statistical test, we settled for comparing the data by a graphic approach. This approach simply consists of comparing a hydrological variable measured in natural rivers and rivers influenced by dams on a graph representing the studied variable as the ordinate and the watershed size as the abscissa. In order to assess the effects of watershed size on the flow regime, the analysis has been restricted to dams with reservoirs, the most common dam management scheme in Québec.

3.3 CHARACTERIZATION OF MONTHLY AVERAGE FLOWS

From the ecological point of view, Richter *et al.* [1996] showed that river flows can be described by the following five characteristics: magnitude, period of occurrence, duration,

variability and frequency. These five characteristics are quantitatively described by 33 hydrological variables known as Indicators of Hydrological Alteration. They allow detection and quantification of the manmade impacts, particularly dams, on natural streamflow regimes. For example, *Richter et al.* [1998] used some of these variables to quantify the impacts of dams in the Colorado River Basin in the United States. These authors emphasized the ecological importance of these characteristics in watercourse management. Thus, they are increasingly used in the scientific community to describe streamflow regimes and quantify the manmade impacts [Claussen and Biggs, 2000; Olden and Poff, 2003; Richter et al., 1997; 1998]. However, these 33 variables are only defined when daily flow logs are available. In our case, we did not have daily flows, due to the fact that the daily flow data measured at the dams are not disclosed to the public by hydroelectric companies for reasons of industrial competition. Our analysis is thus limited to the monthly average flows. However, on this scale, the variables proposed by *Richter et al.* [1996] only account for two characteristics: magnitude and duration. It is possible to show, however, that all the flow characteristics can be defined from a monthly series. We thus defined the following six characteristics (table 3.2) : magnitude, frequency, interannual variability of magnitude, periods of occurrence of the monthly minimum and maximum flows, interannual variability of the periods of occurrence and the shape of the distribution curve (coefficients of flattening and asymmetry). This last characteristic was not proposed by *Richter et al.* [1996] but is commonly used in hydrology. The magnitude was defined by the average flows for each month. Regarding frequency, it was defined by the percentiles 90 (P_{90}) and 10 (P_{10}). P_{90} corresponds to a wet hydrological year and P_{10} to a dry hydrological year. In order to determine the period of occurrence of the monthly maximum or minimum flow, we considered the median Julian day of the month corresponding to the period of occurrence of this flow. For example, if the monthly minimum average flow was observed in January of a hydrological year (from

October to September), the Julian day of the period of occurrence of this flow thus corresponds to January 15. We then calculated the average of the median Julian days over the entire observation period. The same principle applies for the monthly maximum average flows. The interannual variability of the magnitude and the periods of occurrence were estimated by means of the coefficients of variation.

3.4 RESULTS

3.4.1 Impacts of the dams on the periods of occurrence of the monthly maximum and minimum flows and their interannual variability

Figure 3.2 presents the frequencies of the monthly maximum and minimum flows on natural rivers and regulated rivers. The monthly maximum flows (figure 3.2a) on regulated rivers are very frequent in winter (from December to February), while on natural rivers, they occur almost exclusively in spring when the snow melts. An increase in frequency of monthly maximum flows is also noted in the summer and fall downstream from the dams. The frequency of monthly minimum flows (figure 3.2b) becomes very high in spring (from April to June) downstream from the dams when the snow melts. An inversion of the streamflow regimes thus occurs downstream from the dams: the monthly maximum flows occur in winter and the monthly minimum flows in spring.

The interannual variability of the dates of occurrence of the monthly maximum and minimum flows, expressed by the coefficients of variation, is presented in figure 3.3. The monthly maximum flows downstream from the dams are characterized by high variability of dates of occurrence. This variability tends to increase with watershed size. Thus, large watersheds ($> 5000 \text{ km}^2$) are characterized by relatively high coefficients of variation ($> 70\%$). On natural

rivers, the overall coefficients of variation decrease with watershed size. For watersheds larger than 5000 km², the coefficients of variation are less than 40%. Concerning the monthly minimum flows, the trend is opposite that of the monthly maximum flows. Indeed, downstream from the dams, the coefficients of variation are smaller than those of natural rivers. They diminish as the watershed size increases. Thus, for watersheds larger than 5000 km², the coefficients of variation are less than 60% while on natural rivers, this value is largely exceeded. These observations suggest that the variability of the months of occurrence of the maximum flows is greater from year to year downstream from the dams than on natural rivers. The opposite applies for the months of occurrence of the minimum flows. These changes primarily affect watersheds larger than 5000 km².

3.4.2 Impacts of dams on magnitude and frequency

We compared the monthly average flows measured downstream from dams and on natural rivers for the twelve months of the year. The comparison test results of the regression line parameters adjusted over the flows are summarized in table 3.2. Depending on whether or not a change in magnitude is induced by the dams, we distinguished three types of months.

- The months characterized by a significant increase in flows (figures 3.4a and 3.4b). This increase can affect all the watersheds (January and December) or only large watersheds (February and March, figure 3.4b).
- The months characterized by a significant decrease in flows (figures 3.4c and 3.4d). This decrease can affect all watersheds (May and June) or only small watersheds (April).
- Finally, the months that saw now significant change in flows compared to natural rivers.

The results concerning the frequency of flows are summarized in tables 3.3 and 3.4. We observed the same types of changes. Nonetheless, some differences are worth mentioning.

- For P_{90} , which characterizes a wet hydrological year, only the month of October was not affected by any change in flows.
- For P_{10} , which corresponds to a dry hydrological year, four months (July, August, September and October) did show a significant change in flows.

These considerations reveal that the changes in flows downstream from dams primarily occur during wet (P_{90}) and normal hydrological year. In winter, these changes translate into a significant increase in flows and in spring into a significant decrease in flows downstream from dams. In summer and fall, few changes were observed.

3.4.3 Impacts of dams on interannual variability of magnitude

Figure 3.5 summarizes the changes induced by dams on the interannual variability of monthly average flows. We observed the following facts :

- An increase in the coefficients of variation in April, May and June (figure 3.5a). This increase particularly affects watersheds smaller than 10000 km². They are thus characterized by high variability of monthly flows in relation to natural rivers.
- A decrease in the coefficients of variation in November and December (figure 3.5b). This decrease is observed for watersheds larger than 10000 km². However, it must be noted that this decrease is smaller than the increase in the coefficients of variation observed in the spring.

3.4.4 Impacts of dams on the shape of the distribution curves

We should remember that the distribution curve shapes were defined by Pearson's coefficients of asymmetry and flattening. The analysis of the impact of dams will deal both with the values and the signs of these coefficients. Concerning the values of Pearson's coefficients of asymmetry, the twelve months of the year can be grouped in three classes depending on the changes observed or not observed downstream from dams.

- The months characterized by an increase in the values of the coefficients of asymmetry. These are the months of April, May and June (figure 3.6a). This increase particularly affects large watersheds ($> 10000 \text{ km}^2$). Thus, downstream from the dams, all the coefficients of asymmetry become positive.
- The months characterized by a decrease in values of the coefficients of asymmetry: December, January, February and March (figure 3.6b). This decrease also affects large watersheds. Thus, downstream from the dams, the proportion of the watersheds characterized by negative coefficients of asymmetry increases in relation to natural rivers.
- Finally, the months not affected by any change in the values of the coefficients of asymmetry. These are summer (July to August) and autumn months (September to November). However, during these two seasons, changes concerning some watersheds can be observed.

The same trend is observed for the values of the coefficients of flattening. However, the decrease in the values of the coefficients of flattening is much less pronounced than the decrease in the values of the coefficients of asymmetry observed during the cold period (December to March).

3.5 DISCUSSION AND CONCLUSION

Our study of the hydrological impacts of dams makes a contribution on two levels: the application of a new method of analysis of hydrological impacts of dams and the use of many hydrological characteristics to quantify these impacts on a monthly basis.

On the methodological front, up to now, the dam impact studies consist of analyzing the stations separately. This approach does not make it possible to expose the role of each factor that influences the nature and extent of the hydrological impacts induced by the dams, such as the dam management approach, the size of the watersheds, which determines the dimensions of the dams, and the number and age of dams constructed in a watershed. The method we propose allows a clear determination of the influence of watershed size in particular. It is based on the comparison of the flows measured on natural rivers and downstream from dams based on the area of the watersheds. The application of this method of analysis to the monthly flow characteristics for reservoirs in Québec revealed that the magnitude and variability of hydrological changes on the flow regimes induced by the reservoirs clearly depend on watershed size. Indeed, these changes differ for large and small watersheds. Thus, for example, in certain months, hydrological alterations were observed only for watersheds larger than 10000 km². On the other hand, for other months, small watersheds are the most affected. Thus, our study shows for the first time that watershed size significantly influences the scope of the hydrological changes induced by dams in Québec.

Concerning the hydrological variables to be analyzed, *Richter et al.* [1996] had proposed 33 hydrological variables to assess the manmade impacts, particularly dams, on the streamflow regimes. These 33 variables, known as Indicators of Hydrological Alteration, define five basic characteristics. However, on the monthly level, *Richter et al.* [1996] only account for two

characteristics, namely, magnitude (monthly averages) and duration of flows. Thus, most of the studies devoted to the hydrological impacts of dams are most often limited to analysis of these characteristics alone [Batalla *et al.*, 2004; Richter *et al.*, 1997; Erskine *et al.*, 1999; Vivian, 1994]. However, authors sometimes take into account the coefficients of variation of magnitude or coefficients of skewness [Maheshwari *et al.*, 1995]. Within the framework of this study, we accounted for all the basic flow characteristics which can be defined on a monthly scale. The analysis revealed that all these characteristics were altered by the reservoirs. These changes translate into an increase or decrease in values depending on the month. Regarding the period of occurrence, we also showed that dams change the dates of occurrence of the monthly maximum and minimum flows and the interannual variability of these dates. This variability is high for the monthly maximum flows but low for the monthly minimum flows in relation to the variability of natural rivers.

Table 3.5 shows that the changes in the flow regimes also affect both the magnitude of the monthly flows as well as the months of occurrence of the minimum and maximum flows. It is clear that flows in the winter and spring months are the most modified with all of their characteristics being changed by the presence of dams. Dams affect the dates of occurrence, the interannual variability, the magnitude and the frequency of monthly flows for every month of the year. The change in the variability of flow magnitude is, however, only observed for a few months.

What emerges from these considerations is that dam management in Québec must undoubtedly take into account watershed size, which appears to be one of the main factors influencing the scope of the hydrological changes induced by these works. Consequently, this factor must be included in formulating aquatic ecosystem restoration or protection measures. In

other words, some restoration measures must be formulated which are specific to larger watersheds ($> 10000 \text{ km}^2$), as well as others specific to small and medium-sized watersheds.

Finally, the results of this study agree well those reported on the effects of watershed size on the modifications of daily flow regimes produced by dams. *Assani et al.* [2005a, 2005b] have shown that dams with reservoirs tend to decrease the magnitude of floods especially in large watersheds. Low flows, however, display a significant decrease in small and medium size watersheds.

BIBLIOGRAPHY

- Assani, A.A., F. Petit et G. Mabilie, Analyse des débits de la Warche aux barrages de Butgenbach et de Robertville (Ardenne belge). *Bull. Soc. Géogr. Liège*. 36, 17-30, 1999
- Assani, A.A., T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy, Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Rev. Sci. Eau*. 15, 557-574, 2002.
- Assani, A.A., É. Gravel, T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy, Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Rev. Sci. Eau*. 18, 103-127, 2005a.
- Assani, A.A., É. Gravel, A.G. Roy and F. Petit, Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in the three regulated hydrological regimes in Québec. *Hydrol. Process.* (Accepted), 2005b.
- Astrade, L., La gestion des barrages-réservoirs au Québec: exemples d'enjeux environnementaux. *Ann. de Géogr.* 604, 590-609, 1998
- Batalla, R.M., C.M. Gomez and G.M. Kondolf, Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *J. Hydrol* 290, 117-136, 2004.
- Belzile, L., P. Bérubé, V.D. Hoang et M. Leclerc, Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Report submitted by INRS-Eau and Groupe-conseil Génivar inc. to the Ministère de l'Environnement et de la Faune and Fisheries and Oceans Canada. 83 pp. + 8 annexes, 1997.
- Benn, P.C. and W.D. Erskine, Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. *Appl. Geogr.* 14, 153-168, 1994.
- Claussen, B., and B.J.F. Biggs, Flow variable for ecological studies in temperature streams: grouping based on covariance. *J. Hydrol* 237, 184-197, 2000.

Environment Canada, CD-ROM HYDAT, 2000.

Erskine, W.D., N. Terrazzolo and R.F. Warner, River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of large hydro-electric power project: Snowy River, Australia. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* 15, 3-24, 1999.

Maheshwari, B.L., K.F. Walker and T.A. McMahon, Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* 10, 15-38, 1995.

Olden, J.D. and N.L. Poff, Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Applic.* 19, 101-121, 2003.

Peters, D.L., and T. Prowse, Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrol. Process.* 15, 3181-3194, 2001.

Petts, G.E., Impounded Rivers. Perspective for Ecological Management, Wiley, New York. 326 p, 1984.

Poff, N.L. and D.D. Hart, How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *Bioscience* 25, 659-668, 2002.

Ritcher, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell and D.P. Braun, A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conserv. Biol.* 10, 1163-1174, 1996.

Ritcher, B.D., J.V. Baumgartner and D.P. Braun, How much water does a river need? *Freshw. Biol.* 37, 231-249, 1997.

Ritcher, B.D., J.V. Baumgartner, D.P. Braun and J. Powell, A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* 14, 329-340, 1998.

Vivian, H., L'hydrologie artificialisée de l'Isère en amont de Grenoble. Essai de quantification des impacts des aménagements. *Rev. Géogr. Alpine.* 82, 97-112, 1994.

Table 3.1. List of stations directly influenced by Reservoirs in Québec.

River	Station	Latitude (N)	Longitude (O)	Area (km ²)	Dam height (m)	Capacity (x10 ⁶ m ³)	Reservoir surface (km ²)
Betsiamites	02SB002	492115	694715	13400	20	13900	779.6
Bonnard	02RA001	504318	710242	5000	15.5	3900	0.032
Cinconsine	02NE009	472241	730137	211	6	51	11.9
Gatineau	02LG006	464241	755857	15600	25	2345	328.9
Gatineau	02LH008	462013	755649	19800	-	-	-
Gens de Terre	02LG002	471816	762801	2620	3	1	404
Kiamika	02LE018	463720	750755	707	15.8	618	42.5
Manicouagan	02TC004	503840	684330	29300	214	14200	2072
Manouane	02NB003	473300	741100	1500	5.7	410	120
Manouane	02NB002	473756	740012	2240	8.9	205	-
Manouane	02NB001	474531	735337	3060	15	270	28
Manouane	02RB001	503930	703140	5000	11	3900	0.032
Matawin	02NF005	465153	733859	4070	25	31	95.1
Mitchinamecus	02LE008	471258	751028	932	17	106	64.8
Mondonac	02NB005	472708	735558	326	6	99	23.1
Outaouais	02JA003	473636	771826	8210	-	-	-
Outaouais	02JB009	475039	773300	10300	-	-	-
Outaouais	02JB005	474606	781838	13100	26	4970	202.8
Outaouais	02JB006	475600	783438	14000	-	-	-
Outardes	02TE002	494225	685428	17200	17	3400	-
Peribonca	02RC003	495400	711515	11000	-	-	-
Saint-Maurice	02NA001	482010	740331	9480	26	8570	1.15
Shipshaw	02RH004	485325	710220	1740	16.3	494	53.8
Shipshaw	02RH005	491948	705842	227	-	-	-
Toulnustouc	02TC002	500740	675600	7930	-	-	-

Table 3.2. Comparison test of regression line parameters adjusted over the monthly average flows of natural rivers and regulated rivers.

Month	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pr>F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.412	0.0012	0.042	0.984	0.275	<0.0001

Pr> F : level of significance

Table 3.3. Comparison test of regression line parameters adjusted over the P₉₀ flow values of natural rivers and regulated rivers.

Month	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pr>F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.017	0.0068	<0.0001	0.0001	0.0964	0.0007	<0.0001

Pr> F : level of significance

Table 3.4. Comparison test of regression line parameters adjusted over the P₁₀ flows of natural rivers and regulated rivers.

Month	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pr>F	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.4101	0.6462	0,3569	0.0577	0.0216	<0.0001

Pr> F : level of significance

Table 3.5. Summary of change of monthly flow characteristics in Québec.

Flow characteristics	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
Timing												
(Maximum)	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Timing												
(minimum)		+		-	-	-	+	+	+		-	-
Variability of timing	+											
(maximum)												
Variability of timing	-											
(minimum)												
Magnitude			+	+	+	+	-	-	-			
Variability of magnitude	-	-					±	+	+		-	
Frequency			+	+	+	+	-	-	-	±	+	
(P ₉₀)												
Frequency	±	±	+	+	+	+	-	-	-	-		±
(P ₁₀)												
Coefficient of skewness			-	-	-	-		+	+	-		
Coefficient of kurtosis			-	-	-	-	+	+				

+ : Increase ; - : decrease ; ± : increase and decrease according the drainage area

List of tables

Table 3.1. List of stations directly influenced by Reservoirs in Québec.

Table 3.2. Comparison test of regression line parameters adjusted over the monthly average flows values of natural rivers and regulated rivers.

Table 3.3. Comparison test of regression line parameters adjusted over P_{90} flow values of natural rivers and regulated rivers.

Table 3.4. Comparison test of regression line parameters adjusted over P_{10} flows values of natural rivers and regulated rivers.

Table 3.5. Summary of change of monthly flow characteristics in Québec.

List of figures

Figure 3.1. Location of natural river stations (triangles) and regulated river stations (stars).

Figure 3.2. Comparison of frequencies of monthly maximum (a) and minimum (b) flows of natural rivers (black) and regulated rivers (gray).

Figure 3.3. Comparison of the coefficients of variation of the dates of occurrence of the monthly maximum (a) and minimum (b) flows of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles).

Figure 3.4. Comparison of the monthly average flows of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles). a = January, b = March; c = May; d = April.

Figure 3.5. Comparison of the coefficients of variation of magnitude of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles). a = May; b = December.

Figure 3.6. Comparison of the coefficients of asymmetry of natural rivers (circles) and regulated rivers (triangles). a = May; b = December.

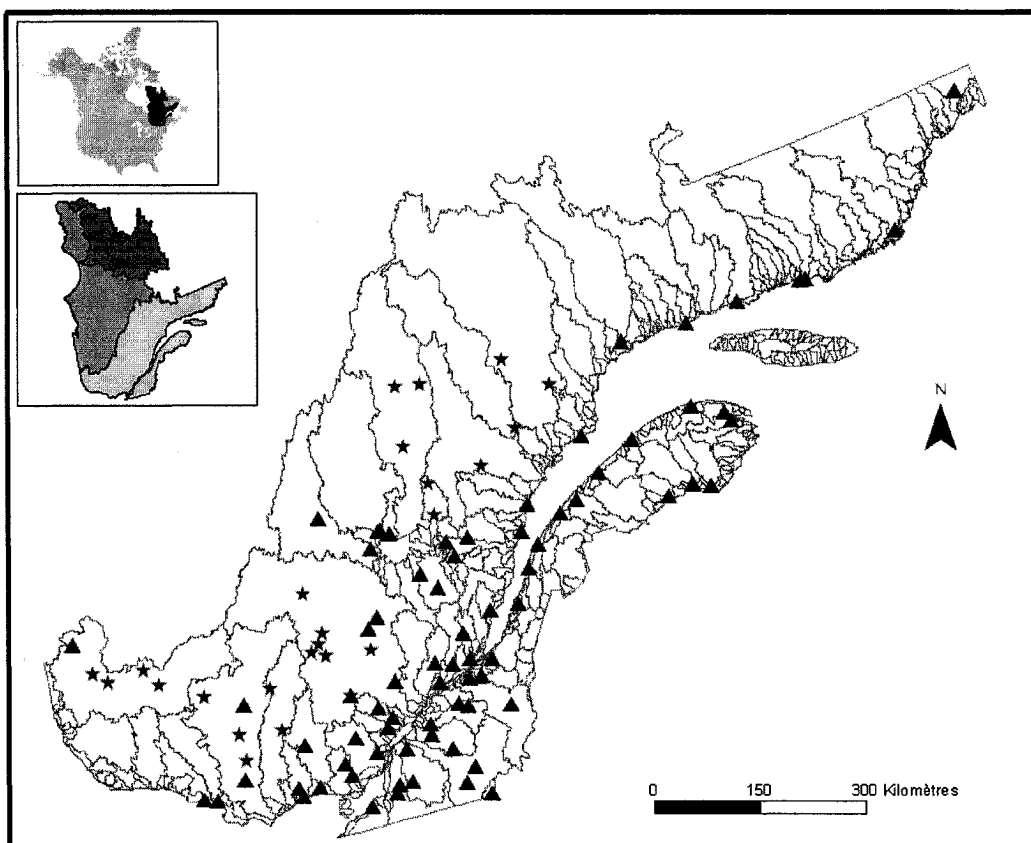


Figure 3.1

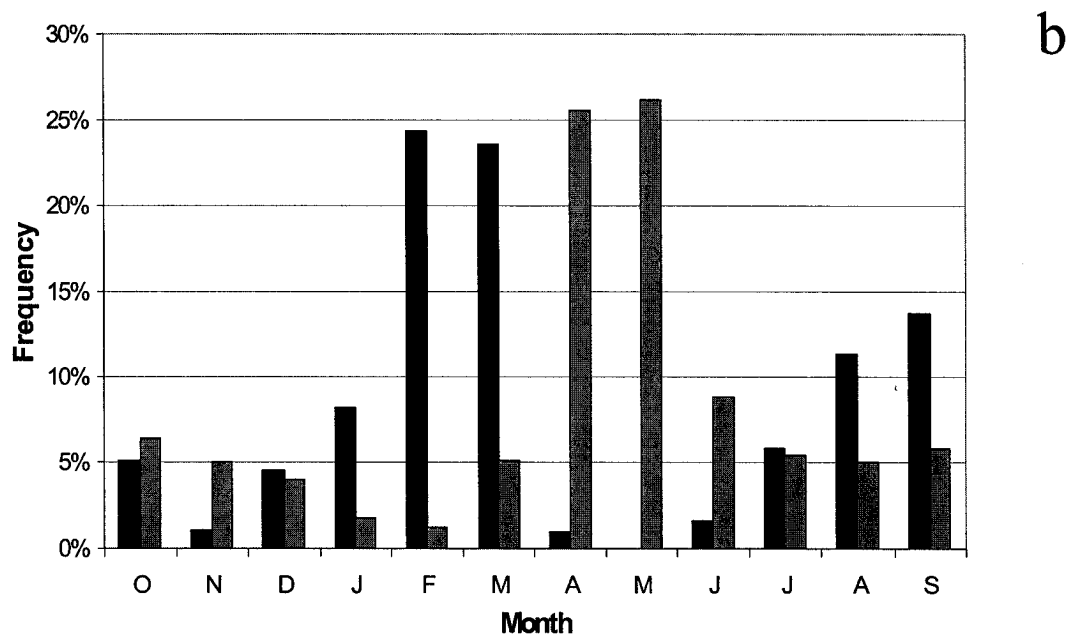
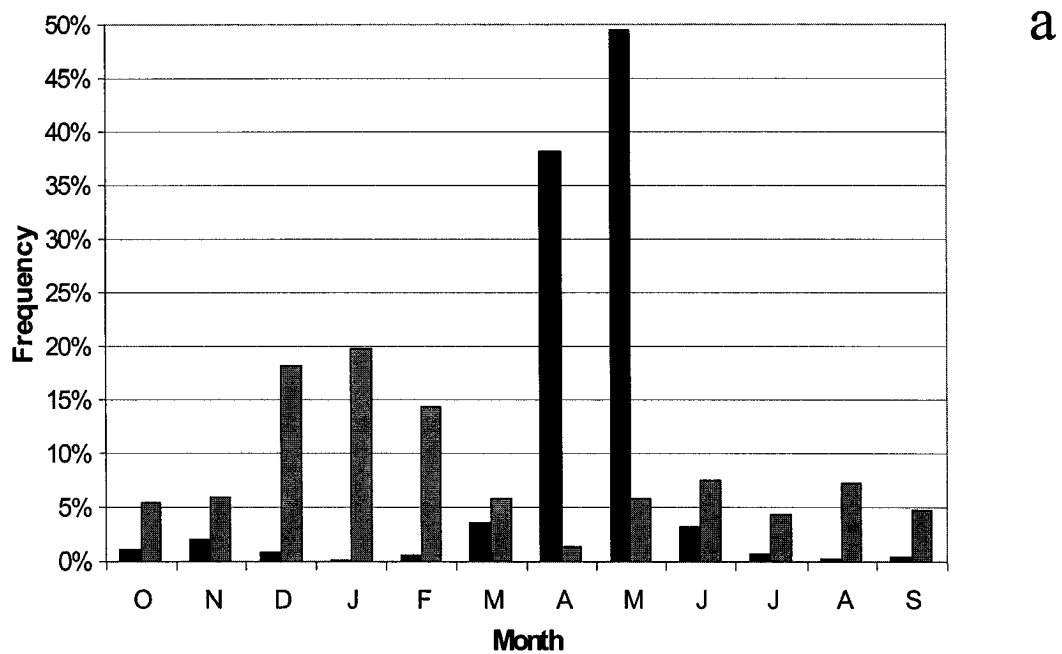


Figure 3.2

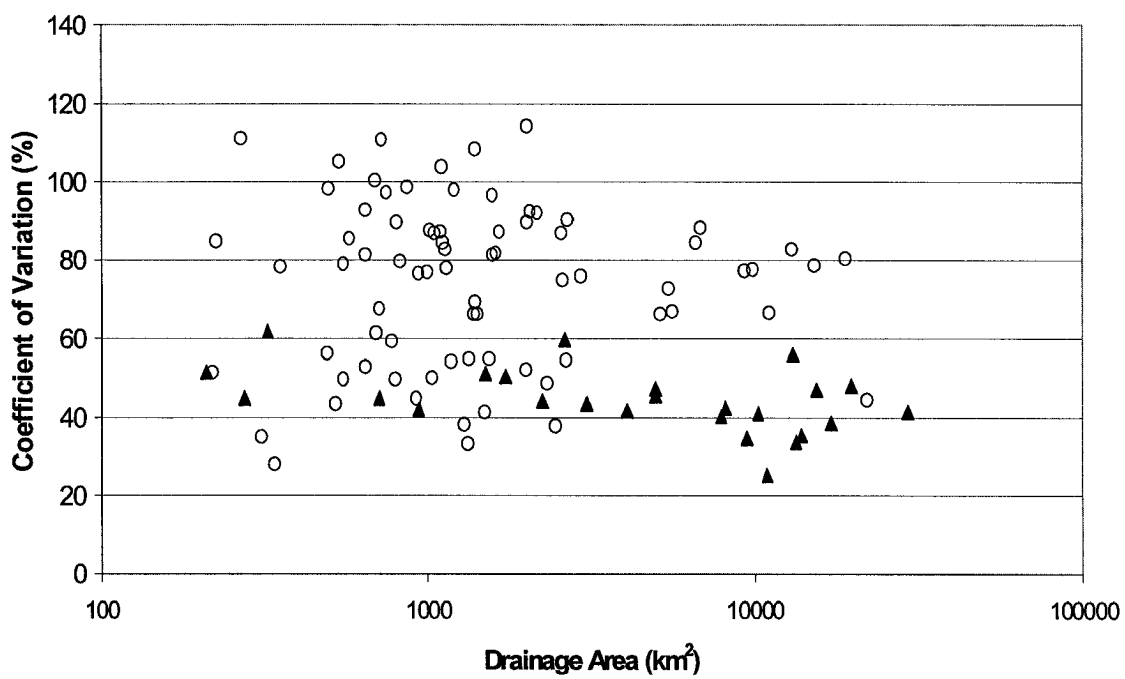
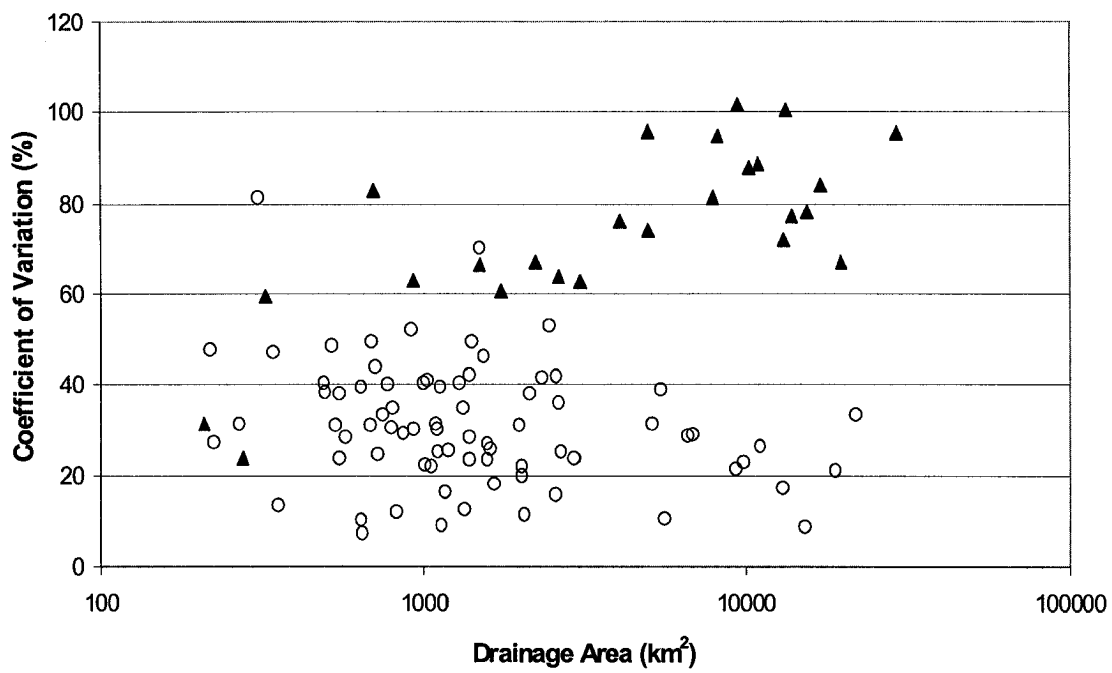
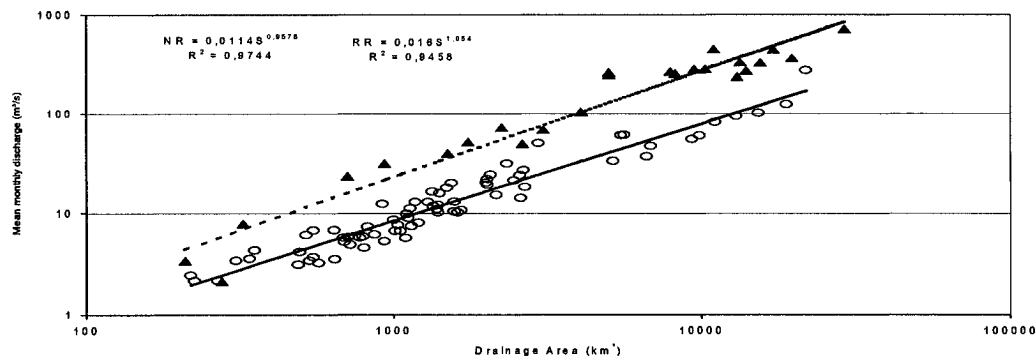
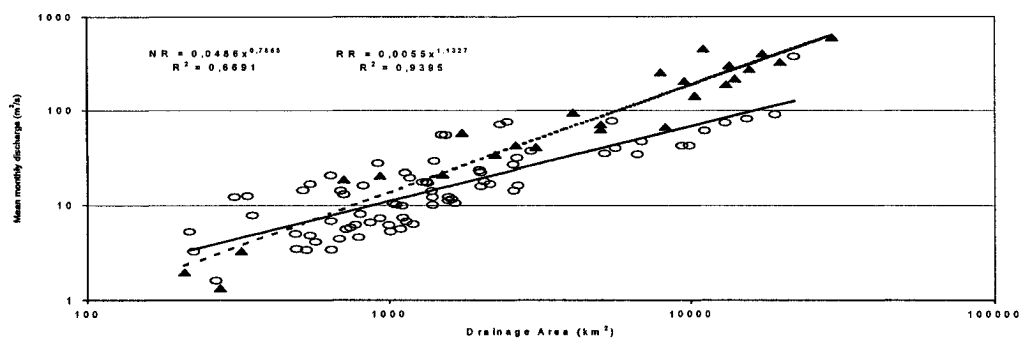


Figure 3.3

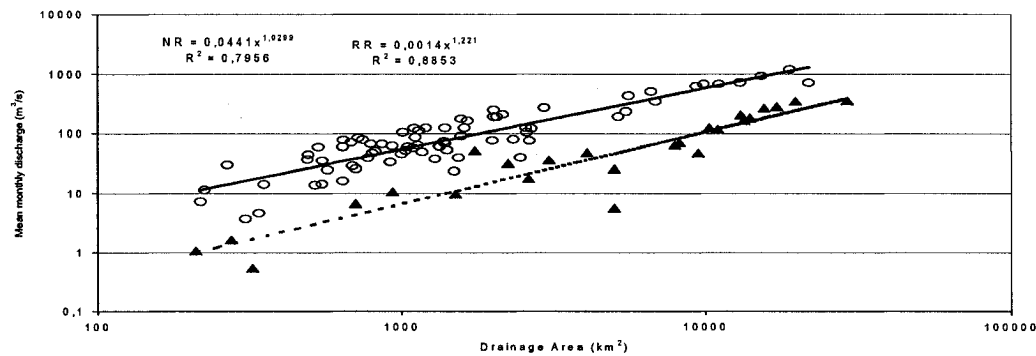
a



b



c



d

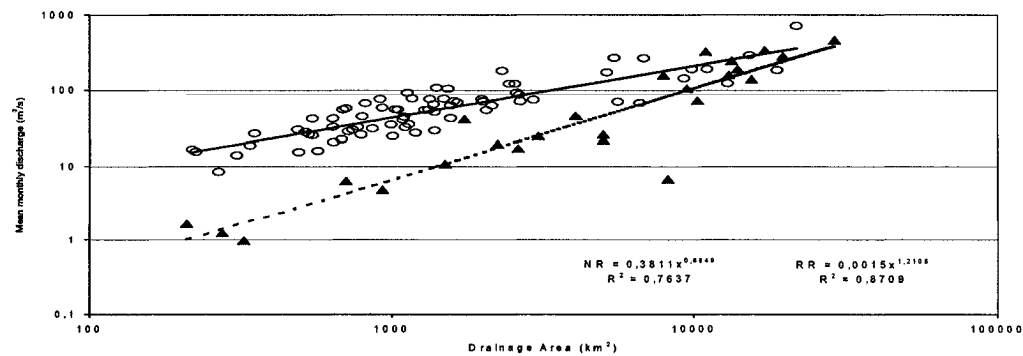


Figure 3.4

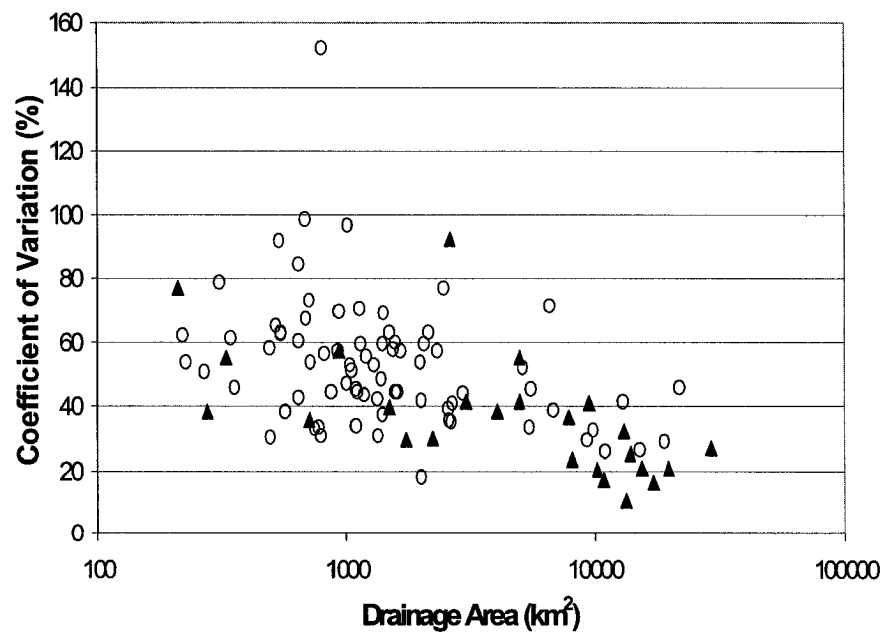
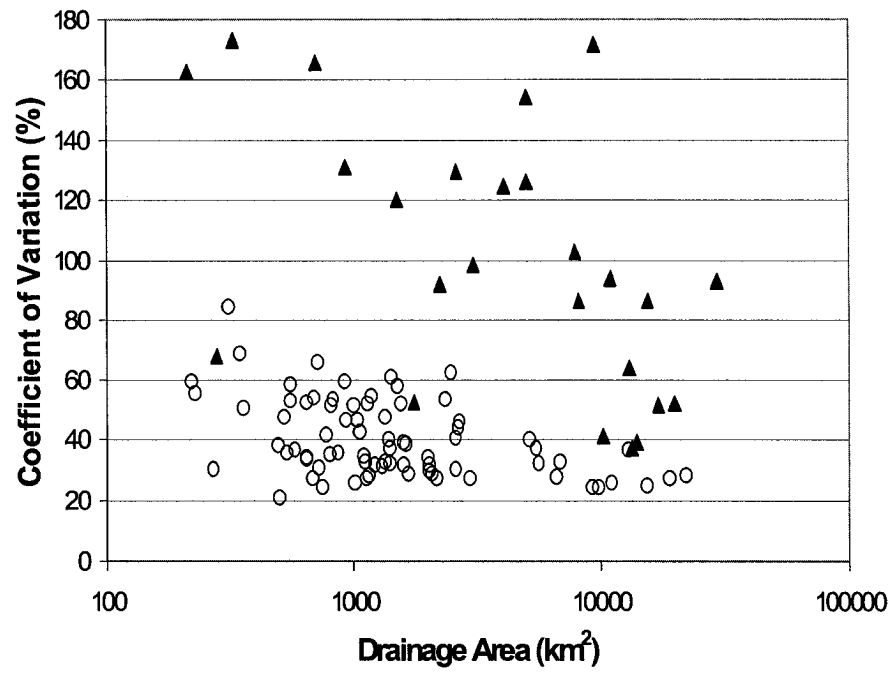


Figure 3.5

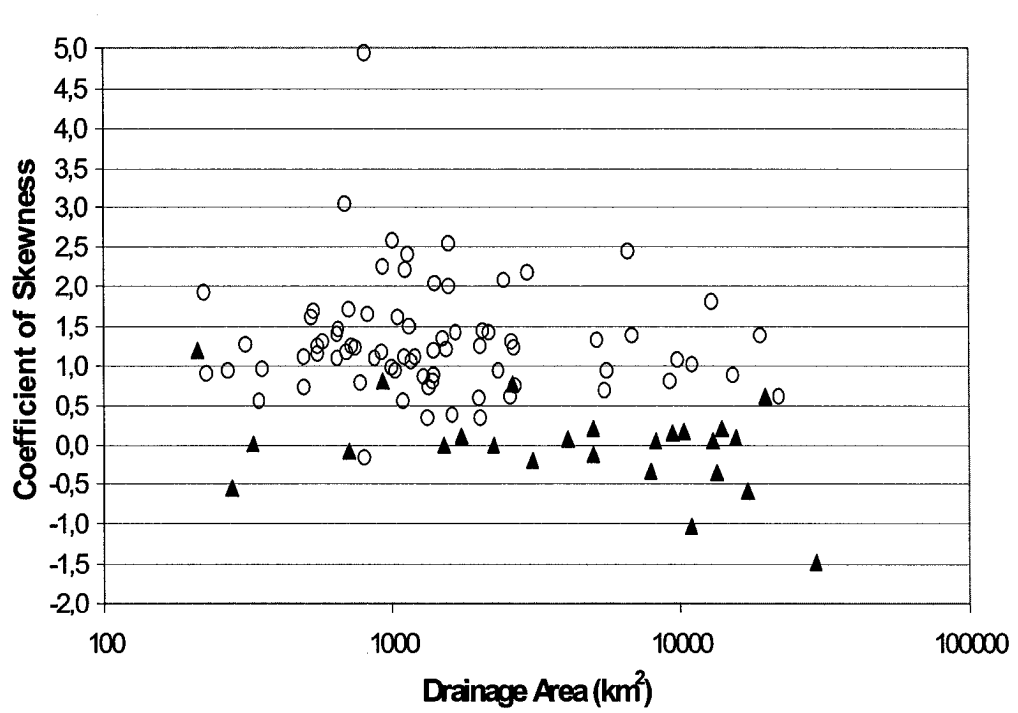
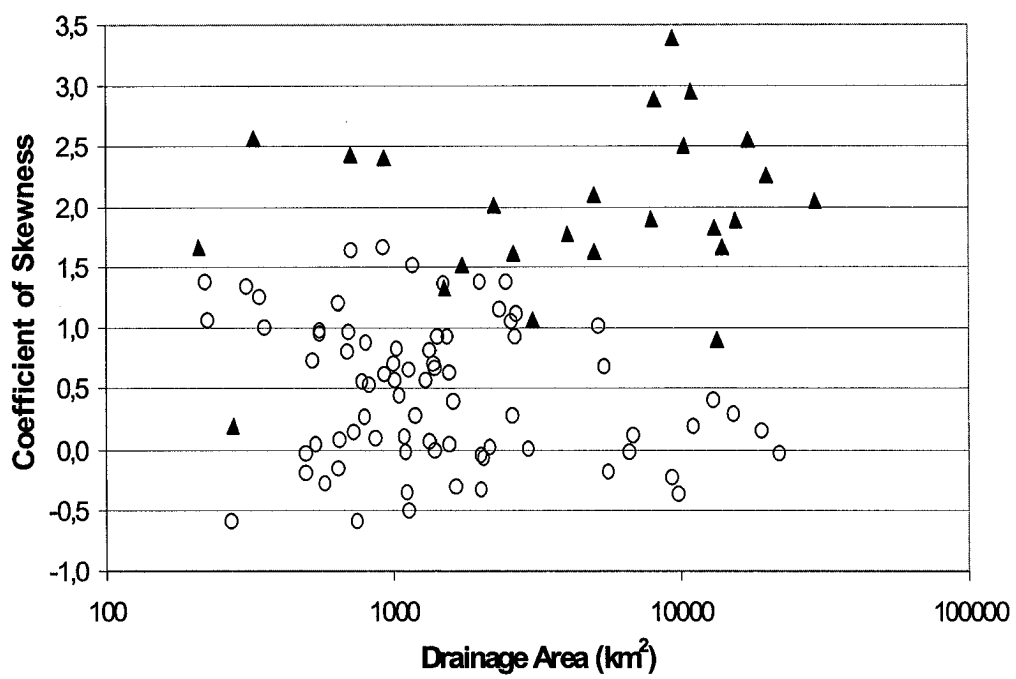


Figure 3.6

CHAPITRE 4

Article soumis au Water Quality Research Journal of Canada

COMPARAISON ENTRE LES DÉBITS RÉSERVÉS ÉCOLOGIQUES ET LES DÉBITS LÂCHÉS EN AVAL DES BARRAGES AU QUÉBEC. INFLUENCE DU MODE DE GESTION DES BARRAGES, DE LA TAILLE DES BASSINS VERSANTS ET DE LA SAISON.

Francis LAJOIE*, Ali A. ASSANI*, Martin MATTEAU* et Mhamed MESFIOUI**

* Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tél. : (819) 376-5011 ; Fax : 376-5179 ; Email : Ali.Assani@uqtr.ca

** Département de Mathématiques et d'Informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Adresse de correspondance

Ali A. ASSANI

Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, Section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tél. : (819) 376-5011 ; Fax : 376-5179 ; Email : Ali.Assani@uqtr.ca

Résumé

Malgré la présence de nombreux barrages au Québec, il n'existe encore aucune étude pour vérifier si les normes des débits réservés écologiques élaborées par Belzile et al. (1997) et adoptées par le ministère de l'Environnement du Québec sont respectées en aval de ces barrages. Cette étude avait pour but de vérifier le respect de ces normes en rapport avec les régimes hydrologiques (modes de gestion) de barrages, la taille des bassins versants et la saison, trois facteurs qui influencent significativement l'ampleur des modifications hydrologiques induites par les barrages au Québec. Il ressort de cette étude que les débits réservés écologiques ne sont pas respectés en aval des barrages. La fréquence de ce non respect (fréquence au non dépassement des débits réservés) ainsi que l'écart entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages dépendent de ces trois facteurs. En ce qui concerne le régime hydrologique, l'écart entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages est plus élevé en régime d'Inversion (barrages associés aux réservoirs) qu'en régime du Type naturel (barrages associés surtout aux centrales hydroélectriques). Quant à la taille des bassins versants, la fréquence et l'écart diminuent avec la taille des bassins versants en régime d'Inversion. Cette influence de la taille des bassins versants est plus marquée sur les écarts entre les débits que sur les fréquences au non dépassement des débits réservés. Enfin, la fréquence au non dépassement des débits réservés est plus élevée au printemps qu'en hiver dans les deux régimes hydrologiques. La différence entre les deux saisons est surtout marquée en régime d'Inversion. En revanche, l'écart entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages n'est pas influencé par la saison.

Mots clés : Barrages, débits réservés écologiques, Inversion, Homogénéisation, Type naturel, Québec.

COMPARISON OF ECOLOGICAL INSTREAM FLOW AND RELEASE FLOW DOWNSTREAM OF DAMS IN QUÉBEC: THE EFFECT OF DAM MANAGEMENT PRACTICES, WATERSHED SIZE AND THE SEASON.

Summary

Despite the presence of many dams in Québec, there is still no study to verify compliance downstream from these dams with the ecological instream flows formulated by Belzile et al. (1997) and adopted by the Ministère de l'Environnement du Québec. The purpose of this study was to verify compliance with these standards in relation to a dam's hydrologic regime (management modes), watershed size and season, three factors that significantly influence the extent of the hydrologic changes induced by dams in Québec. This study shows a lack of compliance with instream flows downstream from the dams. The frequency of this non-compliance (frequencies when the instream flows are not exceeded) and the variance between the instream flows and the released flows downstream from the dams depend on these three factors. Regarding the hydrologic regime, the variance between the instream flows and the released flows downstream from the dams is greater in Inversion regime (dams associated with reservoirs) than in a Natural type regime (dams associated primarily with hydroelectric generating stations). Regarding the watershed size, frequency and variance diminish with the size of the watersheds in Inversion regime. Watershed size has more influence on the variances between flows than on the frequencies when the instream flows are not exceeded. Finally, the frequency when instream flows are not exceeded is greater in spring than in winter in the two hydrologic regimes, but the variance between the two seasons is mainly influenced during Inversion regime. On the other hand, the variance between the instream flows and the released flows downstream from the dams is not influenced by the season.

Key words: Dams, instream flows, Inversion, Homogenization, Natural type regime, Québec.

4.1. Introduction

Le débit réservé, défini comme le débit minimum qui doit être assuré à la rivière tout au long de l'année (Cosandey et Robinson 2000), est l'un des débits majeurs du régime hydrologique d'un cours d'eau en raison de son influence sur le fonctionnement et la structure des écosystèmes aquatiques (Petts 1995; Richter et al. 2003). En effet, le débit réservé détermine le volume d'habitat minimum disponible nécessaire pour la survie des nombreuses communautés aquatiques en période des basses eaux. De plus, il influence le taux de sédimentation des matières en suspension dans le chenal susceptible d'affecter la qualité d'habitats de poissons. Le débit réservé influence aussi l'abondance relative des algues. Celles-ci ont un impact sur l'abondance et la distribution des macroinvertébrés benthiques (Smakhtin 2001). Son rôle est aussi primordial sur la qualité de l'eau car il influence notamment la dilution des polluants et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Enfin, par l'interaction avec les nappes aquifères, le débit réservé influence la densité, la productivité et la composition spécifique de la végétation des milieux humides et des plaines alluviales.

En raison de ces multiples rôles, une littérature relativement abondante a déjà été consacrée au débit réservé. Cette littérature couvre les différents aspects suivants :

- Les méthodes de détermination des débits réservés pour la conservation et la protection des habitats des poissons, la végétation riveraine, la restauration et la conservation des écosystèmes aquatiques en général ou pour les activités récréo-touristiques (e.g. Annear et Conder 1984; Beecher 1990; Caissie et El-Jabi 1995; Estes et Orsborn 1986; Gard et Ballard 2003; Jowet 1997; Karim et al. 1995; Orth 1987; Orth et Leonard 1990; Orth et Maughan 1982; Pitt 2001; Rood et al. 2003a, 2003b, 2003c; Strakosh et al. 2003; Symphorian et al. 2003; Tennant 1976; Vadas 2000; Vilizzi 2002; Vismara et al. 2001; William et McKellar 1984; Whittaker et Shelby 2002).
- Les impacts de débits réservés sur la population des poissons, en particulier celles des saumons, des truites et des invertébrés, ainsi que sur le peuplement forestier en rivières naturelles (e.g. Auble et al. 2005; Gibbins et Acornley 2000; Gibbins et al. 2002; Gore et al. 2001; Horton et al. 2001; Hughes et Rood 2003; Richter et al. 2003; Rood et al. 1995, 2003; Stromberg 2001).

- Les impacts des activités anthropiques (irrigation, barrages, autres aménagements) ou les changements climatiques sur les débits réservés (e.g. Gu et Li 2002; Hamlet et Lettenmaier 1999; Irwin et Freeman 2002; King 2004; Meyer et al. 1999; McIntoch et al. 2002; Payne et al. 2004; Peck et al. 2004; Rood et al. 2003a; Shiau et Wu 2004; Wu et Wang 2002).
- Les aspects juridiques ou économiques liés à l'élaboration des politiques de débits réservés (e.g. Benetti et al. 2004; Boyd 2003; Grove et Oosthuizen 2002; Kaiser et Binion 1998; King 2004; Nieuwoudt 2000; Paretchan 2002; Steyer et Llewellyn 2000; Suppala et al. 2002; Svensson 2000; Ward et Booker 2003).

En revanche, à notre connaissance, il n'existe pas encore de travaux qui s'intéressent particulièrement à la vérification du respect des normes des débits réservés en aval des barrages. Cet aspect est fort important car il permet de prévoir les conséquences qui résultent du non respect de ces normes sur la faune et la flore aquatiques. L'objectif de notre étude est de comparer les débits réservés écologiques élaborés pour protéger les habitats du poisson (Belzile et al. 1997) aux débits journaliers lâchés en aval des barrages au Québec. Cette comparaison se justifie par le fait que l'étude portant sur les impacts des barrages sur les caractéristiques des débits minimums annuels a révélé notamment une diminution significative de ces débits en aval des barrages. L'ampleur de cette diminution dépendait de deux facteurs : le mode de gestion des barrages (régimes hydrologiques artificialisés) et la taille des bassins versants (Assani et al. 2005a). Ainsi, la diminution des débits annuels minimums est importante pour les barrages caractérisés par les régimes d'Inversion et de Type naturel d'une part, et pour les bassins versants de taille inférieure à 10 000 km², d'autre part. À la lumière de ces résultats, il est donc intéressant de vérifier si ces normes des débits réservés écologiques élaborées pour le Québec méridional sont respectées en aval de ces barrages. Notre hypothèse est de démontrer que le respect des débits réservés écologiques en aval des barrages dépend aussi, outre les deux facteurs mentionnés, de la saison. Cet aspect n'est jamais encore étudié au Québec.

4.2. Méthodologie

4.2.1. Sources des données de débits en aval des barrages

Les débits journaliers mesurés en aval des barrages ont été tirés de cédérom HYDAT édité par Environnement Canada (2000). Nous avons comparé les débits réservés et les débits mesurés en aval des barrages durant une période de 30 ans (1960-1990). C'est presque sur la même période que les débits réservés ont été calculés. En raison des lacunes dans les séries hydrologiques journalières, nous avons retenu seulement 18 rivières régularisées (figure 4.1) dont les données de débits journaliers étaient complètes (tableau 4.1). Ces rivières appartiennent aux trois régimes hydrologiques définis en aval des barrages au Québec, chaque régime hydrologique correspondant à un mode de gestion spécifique des barrages (Assani et al. 2004).

- Le régime d'Inversion est caractérisé par des débits mensuels maximums en hiver (décembre à mars) et des débits mensuels minimums au printemps (d'avril à juin) au moment de la fonte des neiges. Le cycle hydrologique naturel est donc complètement inversé. Ce type de régime ne s'observe exclusivement qu'en rive nord du fleuve Saint-Laurent en raison du faible écoulement hivernal et d'une forte production de l'énergie électrique en hiver (figure 4.2a). Il représente le tiers de barrages au Québec et est associé aux barrages réservoirs.
- Le régime d'Homogénéisation est caractérisé par une faible variation des débits durant toute l'année. C'est un régime moins contrasté que le régime précédent (figure 4.2b). De fait, le rapport entre les débits mensuels maximums et minimums est proche de 1 alors qu'en condition naturelle, il est toujours supérieur à 5. De plus, contrairement au régime précédent, les débits mensuels minimums ne sont jamais enregistrés au printemps au moment de la fonte des neiges. Mais en revanche, les débits mensuels maximums peuvent survenir en hiver. Ce régime hydrologique artificialisé est très fréquent en rive nord. Il représente environ 20% de barrages au Québec et est aussi associé aux barrages réservoirs mais construits sur des grands cours d'eau. C'est le régime le moins fréquent par rapport aux deux autres. Il est ainsi représenté seulement par deux stations. Il ne sera pas analysé en raison de ce faible nombre de stations.
- Le régime de Type naturel est caractérisé par un cycle hydrologique annuel comparable à celui des rivières naturelles. Les débits mensuels maximums sont mesurés au printemps, au moment de la fonte de neiges, et les débits mensuels minimums en hiver

et/ou en été (figure 4.2c). Ce régime se distingue des régimes strictement naturels par une légère hausse des débits en hiver et une légère baisse au printemps. Contrairement aux deux régimes précédents, il est bien représenté sur les deux rives du fleuve Saint-Laurent. Il est associé aux centrales hydroélectriques et aux barrages au fil de l'eau.

4.2.2. Estimation des débits réservés écologiques en aval des barrages

Il existe de nombreuses méthodes pour estimer les débits réservés. Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu la méthode de calcul des débits réservés proposée par Belzile et al. (1997) pour les raisons suivantes :

- Elle fait partie des méthodes recommandées par la FAPAQ (1999) et le ministère de l'Environnement du Québec pour estimer les débits réservés au Québec. À ce propos, la FAPAQ note dans son document que « Parmi les méthodes hydrologiques disponibles, Faune et Parcs Québec ainsi que le ministère de l'Environnement du Québec recommandent l'utilisation de la méthode écohydrologique (Belzile et al. 1997) mise au point pour les rivières du Québec. Cette méthode prend en considération les facteurs écologiques, hydrologiques et géographiques propres aux cours d'eau de la province. Elle tient compte des espèces présentes dans l'ensemble des bassins versants du Québec ainsi que des stades critiques de leur cycle vital, ce que les autres méthodes hydrologiques ne font pas ». La FAPAQ définit les débits réservés écologiques comme étant les débits minimums requis pour maintenir, à un niveau jugé acceptable, les habitats du poisson (FAPAQ 1999).
- Elle est simple d'application mais tout en tenant compte des différents stades de cycles de vie de différentes espèces de poissons au Québec.
- C'est la seule méthode qui permet d'estimer les débits réservés de n'importe quelle rivière du Québec méridional sur la seule base des valeurs des débits (méthode hydrologique). Par conséquent, c'est la seule méthode qui permet d'estimer les débits réservés en aval de tous les barrages au Québec sans aucune mesure de terrain.

Les méthodes d'élaboration des débits réservés écologiques sont exposées en détail par Belzile et al. (1997). Ce sont des méthodes hydrologiques évoluées adaptées au Québec pour répondre aux besoins spécifiques de différentes régions hydroécologiques afin de mieux protéger

les habitats de poisson en général et des espèces de poisson cibles en particulier durant les différentes périodes (mois et saisons) de l'année. Les espèces cibles sont des espèces qui requièrent plus d'attention que d'autres en raison de leur rareté, leur statut d'espèces menacées, leur intérêt sportif ou économique, ou encore leur sensibilité particulière aux modifications des conditions naturelles d'écoulement à des moments bien précis de leur cycle vital. Le nombre de ces espèces cibles varie d'une région hydrologique à une autre. Pour plus détails sur ces espèces, lire Belzile et al. (1997). Ces auteurs ont ainsi proposé 6 indices des débits réservés écologiques qui tiennent compte des régions hydrologiques et des phases critiques du cycle vital des espèces cibles durant l'année. Ces indices sont résumés au tableau 4.2. Il convient de préciser d'emblée que l'objectif de notre étude n'est pas de critiquer la méthode utilisée par les auteurs dans l'élaboration de ces indices. Cet aspect dépasse le cadre de cette étude qui se limite à la comparaison des débits réservés aux débits lâchés en aval des barrages.

Pour estimer les débits réservés écologiques en aval des barrages au moyen de la méthode de Belzile et al. (1997), nous avons procédé par les étapes suivantes :

- Déterminer les région hydrologique et écologique homogènes de la station influencée directement par un barrage au moyen des coordonnées géographiques de la station. Sur le plan hydrologique, le Québec méridional a été divisé en onze régions hydrologiques homogènes (H-1 à H-11) sur la base des données de débits moyens annuels ainsi que les débits maximums et minimums annuels. Sur le plan écologique, il a été divisé en dix régions écologiques homogènes en fonction des espèces cibles et des politiques appliquées pour leur protection.
- Déterminer le mois pour lequel on veut estimer le débit réservé et choisir les indices qui correspondent à la saison du mois considéré (tableau 4.2).
- Enfin, appliquer la formule 1 qui permet d'estimer le débit réservé écologique à une station donnée. Cette formule a pour expression mathématique :

$$Q_r = e^k \cdot S^a \quad (1)$$

Q_r est le débit réservé écologique (en m^3/s) à estimer à une station donnée dont la superficie du bassin versant est S en km^2 . k et a sont des exposants régionalisés et saisonnalisés. e

est le logarithme népérien. Les valeurs des exposants k et a dépendent des régions écologique et hydrologique, de la période de l'année, des phases critiques du cycle vital des espèces de poissons cibles dans les différentes régions écohydrologiques. Elles ont été calculées par Belzile et al. (1997) en fonction de ces différents facteurs.

L'estimation des débits réservés à partir de la seule superficie des bassins versants peut paraître simpliste. Mais Belzile et al. (1997) justifient cette approche par le fait que « dans toutes les régions écohydrologiques, la connaissance de la superficie du bassin versant en amont du point où l'on veut estimer le débit peut, à elle seule, suffire pour déterminer ce dernier. Les autres variables n'ajoutent que peu d'informations ou de précisions additionnelles à l'estimation ». Cet argument a été aussi évoqué par Anctil et al. (1998, 2000) en ce qui concerne les débits de crues et d'étiages au Québec. Ces auteurs ont ainsi proposé d'utiliser la superficie du bassin versant pour estimer les débits maximums annuels et d'étiages 7-jours. Au demeurant, au Québec, il existe toujours une forte corrélation entre les débits et les superficies de bassins versants, quelle que soit l'échelle d'analyse (Assani et al. 2005a, 2005b).

4.2.3. Méthodes de comparaison des débits réservés écologiques et les débits mesurés en aval des barrages

Nous avons comparé les deux caractéristiques de débits suivantes : la fréquence et le volume d'écoulement (magnitude). En ce qui concerne la fréquence, pour chaque mois de l'année, nous avons calculé le rapport entre le nombre de jours où le débit journalier lâché en aval d'un barrage était inférieur au débit réservé écologique estimé le même jour au moyen de la formule 1. Il s'agit, de fait, de la fréquence au non dépassement des débits réservés en aval des barrages. Puis, nous avons calculé les moyennes des fréquences mensuelles et saisonnières pour chaque rivière pendant les 30 ans d'étude. En ce qui concerne la délimitation des saisons, nous avons regroupé les 12 mois de l'année de la manière suivante : Automne (octobre à décembre), hiver (janvier à mars), printemps (avril à juin) et été (juillet à septembre). Quant au volume d'écoulement, pour les jours dont les débits réservés étaient supérieurs aux débits lâchés en aval des barrages, nous avons calculé l'écart entre les volumes d'écoulement des débits réservés et des débits lâchés en aval des barrages au moyen de la relation suivante :

$$E (\%) = \frac{(Q_r - Q_o) \times 100}{Q_r} \quad (2)$$

Q_o est le débit journalier lâché en aval d'un barrage.

Enfin, à l'instar des fréquences, nous avons calculé les moyennes mensuelles et saisonnières de ces écarts pour chaque rivière.

4.2.4. Méthodes d'analyse des données

Pour déterminer l'influence de la taille des bassins versants sur les fréquences et les écarts, nous avons calculé une régression entre ces variables et les superficies des bassins versants pour chaque régime artificialisé aux échelles annuelles et saisonnières. Les deux paramètres de droites de régression (pente et ordonnée à l'origine) ont été testés par l'analyse de variance. En ce qui concerne l'influence du mode de gestion et de la saison sur les moyennes saisonnières des fréquences et des écarts, nous avons appliqué les tests suivants:

- l'analyse de variance à un seul critère de classification (Dagnelie 1986) pour déterminer l'influence de chacun de ces deux facteurs (saison et régime hydrologique);
- l'analyse de variance avec deux critères de classification (modèle croisé) pour déterminer l'influence de l'interaction de ces deux facteurs sur ces moyennes;
- le test de Scheffé pour déterminer lesquelles des moyennes saisonnières sont significativement différentes après le rejet de l'hypothèse nulle (égalité des moyennes);
- enfin, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis (Dagnelie 1986) pour confirmer les conclusions obtenues par l'analyse de variance à un critère de classification qui est un test paramétrique.

4.3. Résultats

4.3.1. Influence de la taille des bassins versants

Les paramètres des droites de régression calculés entre les superficies de bassins versants et les fréquences au non dépassements des débits réservés en aval des barrages révèlent l'absence

d'un lien significatif entre les deux variables en régime de Type naturel aussi bien à l'échelle annuelle qu'aux échelles saisonnières (tableau 4.3a et figure 4.3). À titre indicatif, nous avons représenté aussi les deux stations du régime d'Homogénéisation. En revanche, pour le régime d'Inversion, il existe un lien significatif entre les deux variables en été et en automne ainsi qu'à l'échelle annuelle. La fréquence du nombre des jours caractérisés par des débits réservés supérieurs aux débits lâchés en aval des barrages diminue lorsque la taille des bassins versants augmente. Cette relation est maintenue même après avoir appliqué une transformation logarithmique aux variables afin d'éliminer « l'effet de taille » sur les valeurs des coefficients de corrélation. Il convient toutefois de noter que les valeurs critiques de F sont proches de 0,05. En d'autres termes, il serait nécessaire d'augmenter le nombre des rivières analysées pour confirmer de manière définitive cette conclusion. Quant aux écarts entre les volumes d'écoulement (magnitude) des débits réservés et les débits journaliers lâchés en aval des barrages, ils sont fortement influencés par les superficies des bassins versants en régime d'Inversion aussi bien à l'échelle annuelle qu'aux échelles saisonnières (tableau 4.3b). Néanmoins, les valeurs de coefficients de détermination (R^2) deviennent plus élevées que celles calculées pour les fréquences au non dépassement des débits réservés. Ainsi, l'influence de la taille des bassins versants est plus importante sur les écarts que sur les fréquences. Pour les deux variables (écarts et fréquences), les écarts diminuent avec la taille des bassins versants. En régime du Type naturel, la taille des bassins versants n'influence pas les écarts entre les débits car aucune régression n'est statistiquement significative, hormis celle calculée en hiver mais dont la valeur critique de F est proche de 0,05.

4.3.2. Influence de la saison et du régime hydrologique (mode de gestion) des barrages

4.3.2.1. Influence sur les fréquences moyennes du nombre des jours dont les débits réservés sont supérieurs aux débits lâchés en aval des barrages

Les fréquences moyennes varient d'une saison à l'autre. Elles sont plus élevées au printemps mais faibles en hiver pour les deux régimes hydrologiques (tableau 4.4a). Néanmoins, en régime de Type naturel, elles sont aussi élevées en été. L'application de l'analyse de variance à un seul critère de classification révèle que les fréquences moyennes saisonnières peuvent être considérées comme significativement différentes pour les deux régimes hydrologiques. En effet, la valeur critique de F est inférieure à 0,05 (tableau 4.4b).

Pour déterminer lesquelles de ces moyennes saisonnières des fréquences sont réellement différentes, nous avons appliqué le test de Scheffé (tableau 4.4c). Celui-ci révèle qu'en régime d'Inversion, les fréquences moyennes printanières sont significativement différentes de celles de trois autres saisons d'une part, et les fréquences moyennes d'été sont significativement différentes de celles de l'hiver, d'autre part. En régime de Type naturel, les fréquences moyennes printanières sont significativement différentes de celles de l'hiver. Ces dernières sont aussi différentes de celles de l'été. Il s'ensuit que pour les deux régimes hydrologiques, la différence des fréquences est surtout observée entre la saison hivernale et les saisons de printemps et d'été. Ces résultats ont été confirmés par le test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

L'application de l'analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé) révèle que les différences des moyennes des fréquences observées entre les saisons dépendent du régime hydrologique (mode de gestion) des barrages (tableau 4.4d). Ainsi, ces différences sont beaucoup plus importantes en régime d'Inversion qu'en régime de Type naturel. Dans le premier régime, les fréquences moyennes printanières sont environ huit fois plus élevées au printemps qu'en hiver alors que dans le second régime, elles le sont environ deux fois seulement.

4.3.2.2. Influence sur les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages

Les conséquences écologiques du non respect des débits réservés dépendent surtout des écarts du volume d'écoulement (magnitude) entre les débits lâchés en aval des barrages et les débits réservés. En effet, c'est le volume d'écoulement qui détermine le volume d'habitat. En régime d'Inversion, les moyennes des écarts sont très élevées en hiver et au printemps. Durant les deux saisons, les débits lâchés en aval des barrages sont inférieurs au tiers du volume d'écoulement des débits réservés. En régime du Type naturel, les moyennes des écarts sont presque égales durant les quatre saisons. Les débits lâchés en aval des barrages sont en moyenne deux fois environ inférieurs aux débits réservés (tableau 4.5a). La comparaison des moyennes des écarts n'a révélé aucune différence significative entre les saisons pour les deux régimes hydrologiques. En effet, les valeurs critiques de F sont supérieures à 0,05 (tableau 4.5b). Il s'ensuit que contrairement aux fréquences moyennes, les moyennes des écarts ne sont pas influencés par la saison. En revanche, les moyennes des écarts sont influencées par le régime

hydrologique (tableau 4.5c). Ainsi, ces moyennes sont plus élevées en régimes d’Inversion qu’en régime de Type naturel.

4.4. Discussion et Conclusion

Malgré la présence des milliers de barrages au Québec (Astrade 1998), aucune étude ne s’est jamais intéressée à vérifier les normes des débits réservés écologiques adoptées par la FAPAQ (1999) en aval de ces ouvrages. Pourtant la vérification de ces normes est très importante pour protéger les habitats du poisson et s’assurer de la qualité de l’eau en aval des barrages. Cette étude est donc la première consacrée à la vérification des normes des débits réservés écologiques en aval des barrages au Québec. Son apport scientifique réside dans le fait qu’elle a permis de déterminer les facteurs qui influencent la fréquence du non respect des normes des débits réservés d’une part et les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval, d’autre part. Il ressort de cette étude que ces deux caractéristiques (fréquence et écart des débits) sont influencées par les trois facteurs suivants :

- Le mode de gestion de barrages qui détermine le type de régime hydrologique régularisé. Ce facteur affecte seulement les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages. Ainsi, ces écarts sont plus élevés en régime d’Inversion (environ 61% en moyenne) qu’en régime de Type naturel (environ 45% en moyenne).
- La taille des bassins versants. La fréquence du non respect des débits réservés et l’écart entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages dépendent de la taille des bassins versants. Les valeurs de ces deux variables diminuent lorsque la taille des bassins versants augmente. Les normes des débits réservés tendent à être respectées pour les bassins versants de grande taille ($> 10000 \text{ km}^2$). Mais cette influence de la taille des bassins versants est observée seulement en régime d’Inversion. Elle est plus forte pour les écarts entre les débits que pour les fréquences au non dépassement. En régime de Type naturel, l’influence de la taille des bassins versants sur les écarts entre les débits est inexistante, hormis durant la saison hivernale.
- La saison. Dans les trois régimes hydrologiques régularisés, la fréquence du nombre des jours des débits inférieurs aux débits réservés est plus élevée au printemps et en été. En revanche, cette fréquence diminue significativement en hiver et à la fin de l’automne. Les

différences des fréquences moyennes saisonnières sont beaucoup plus importantes en régime d’Inversion qu’en régime de Type naturel. Ainsi, les fréquences moyennes sont environ huit fois plus élevées au printemps qu’en hiver en régime d’Inversion. Ce rapport se réduit à deux en régime de Type naturel. Quant aux écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages, aucune différence significative n’a été observée entre les saisons pour les deux régimes hydrologiques.

Ces résultats démontrent que c’est en régime d’Inversion que les débits réservés écologiques ne sont pas surtout respectés, et ce pour les petits et moyens bassins versants. Comme nous l’avons déjà démontré par ailleurs (Assani et al. 2002; 2005a, 2005b), le régime d’Inversion est le régime le plus affecté par les barrages au Québec. Toutes les caractéristiques des débits (volume d’écoulement, fréquence, période d’occurrence, durée et variabilité) y sont modifiées. Ce type de régime est rare dans le monde. Sa fréquence élevée au Québec s’explique par un climat hivernal très rigoureux qui exige une surproduction de l’énergie hydroélectrique. Or en hiver, en raison du stockage des précipitations sous forme des neiges, les débits de rivières sont relativement faibles pour pouvoir satisfaire le besoin en énergie électrique. Ainsi, on a construit de nombreux barrages réservoirs ayant comme seul objectif d’alimenter en eau les centrales hydroélectriques construites en aval pendant la période hivernale. Il s’ensuit qu’en hiver, on lâche beaucoup d’eau en aval des réservoirs et, en revanche, au printemps, on stocke toute l’eau provenant de la fonte de neiges pour reconstituer les réserves qui seront utilisées l’hiver suivant. Ce mode de gestion entraîne une inversion totale du cycle naturel des débits en aval des réservoirs : les débits sont les plus élevés en hiver mais très faibles au printemps et en été. Il est évident qu’en hiver les écoulements sont beaucoup plus faibles dans les petits et les moyens que dans les grands bassins versants. Ce qui explique ainsi l’influence de la taille des bassins versants sur les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages. Le régime du Type naturel est un régime observé en aval des centrales hydroélectriques ou des barrages au fil de l’eau. La quantité d’eau stockée est très faible durant toute l’année car ces types de barrages sont généralement alimentés par des réservoirs construits en amont. En hiver, l’eau est utilisée pour faire tourner les turbines et au printemps, elle est lâchée pour réduire les risques d’inondation. Ainsi, les différences saisonnières sont réduites comparativement au régime précédent. Mais contrairement à l’opinion couramment admise selon laquelle ces types de

barrages ne modifient pas les caractéristiques des débits, notre étude a bien démontré que même en aval de ces barrages, les débits réservés ne sont pas respectés. La régulation des débits malgré le faible stockage d'eau affecte les volumes d'eau lâchés en aval des barrages.

La conclusion majeure qui se dégage de cette étude est que les mêmes normes des débits réservés ne peuvent pas être appliquées à tous les barrages au Québec. Ces normes doivent tenir compte impérativement de deux facteurs suivants : le mode de gestion du barrage et la taille du bassin versant. En effet, il a été démontré que ce sont les deux facteurs qui influencent l'ampleur des changements hydrologiques induits par les barrages au Québec (Assani et al. 2004, 2005a, 2005b). L'élaboration d'autres normes des débits réservés écologiques qui doivent tenir compte spécifiquement du mode de gestion et de la taille des bassins versants s'impose.

Bibliographie

- Anctil F, Martel F, Hoang VD. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Can. J. Civ. Eng.* **25** : 125-146.
- Anctil F, Larouche W, Hoang VD. 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Qual. Res. J. Canada.* **35** : 125-146.
- Annear TC, Conder C. 1984. Relative bias of several fisheries instream flow methods. *N. Am. J. Fish. Manage.* **4** : 531-539.
- Assani AA, Buffin-Bélanger T, Roy AG. 2002. Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Rev. Sci. Eau* **15** : 557-574.
- Assani AA, Gravel É, Buffin-Bélanger T, Roy AG. 2004. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques des rivières régularisées au Québec. Application de l'approche écologique. Submitted to *Can. Water Res. J.*
- Assani AA, Gravel É, Buffin-Bélanger T, Roy AG. 2005a. Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Rev. Sci. Eau* **18** : 103-127.
- Assani A.A., Stichelbout É., Roy AG., Petit F. 2005b. Comparison of impacts on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes. *Hydrol. Process.* (accepted).
- Astrade L. 1998. La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux. *Ann. Géo.* **604** : 590-609.
- Auble GT, Scott ML, Friedman JM. 2005. Use of individualistic streamflow-vegetation relations along the Fremont River, Utah, USA to assess impacts of flow alteration on wetland and riparian areas. *Wetlands* **25** : 143-154.
- Beecher H.A. 1990. Standards for instream flows. *Rivers* **1** : 97-109.
- Belzile L., Bérubé P., Hoang VD., Leclerc M.. 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83 pp. + 8 annexes.
- Benetti AD, Lanna AE, Cobalchini MS. 2004. Current practices for establishing environmental flows in Brazil. *River Res. Applic.* **20** : 427-444.

- Boyd JA. 2003. Hip deep : a survey of states instream flow law from the Rocky Mountains to Pacific Ocean. *Nat. Resour. J.* **43** : 1151-1216.
- Caissie D, El-Jabi N. 1995. Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. *Can. J. Civ. Eng.* **22** : 235-246.
- Cosandey C, Robinson M. 2000. *Hydrologie continentale*. Armand Colin, Paris.
- Dagnelie P. 1986. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux. 463p.
- Environnement Canada (2000), CD-ROM HYDAT.
- Estes CC, Orsborn JF. 1986. Review and analysis of methods for quantifying instream flow requirements. *Water Resour. Bull.* **22** : 389-398.
- Faune et Parcs Québec (FAPAQ). 1999. *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*. Ministère de l'environnement et de la faune du Québec, Direction de la faune et des habitats, Québec.
- Gard M, Ballard E. 2003. Applications of new technologies to instream flow studies in large rivers. *North Am. J. Fish. Manage.* **23** : 1114-1125.
- Gibbins CN, Acornley RM. 2000. Salmonid habitat modelling studies and their contribution to the development of an ecologically acceptable release policy for Kielder Reservoir, North-East England. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* **16** : 203-224.
- Gibbins CN, Moir HJ, Webb JH, Soulsby C. 2002. Assessing discharge use by spawning atlantic salmon: a comparison of discharge electivity indices and PHABSIM simulations. *River Res. Applic.* **18** : 383-395.
- Gore JA, Layzer JB, Mead J. 2001. Macroinvertebrate instream flow studies after 20 years : a role in stream management and restoration. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* **17** : 527-542.
- Grove B, Oosthuizen LK. 2002. An economic analysis of alternative water use strategies at catchment level taking into account an instream flow requirement. *J. Am. Water Res. Ass.* **38** : 385-395.
- Gu RR, Li YT. 2002. River temperature sensitivity to hydraulic and meteorological parameters. *J. Env. Manage.* **66** : 43-56.
- Hamlet AF, Lettenmaier DP. 1999. Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia River basin. *J. Am. Water Res. Ass.* **35** : 1597-1623.

- Horton JL, Kolb TE, Hart SC. 2001. Responses of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semi-arid river basin. *Plant Cell Env.* **24** : 293-304.
- Hughes FMR, Rood SB. 2003. Allocation of river flows for restoration of floodplain forest ecosystems : a review of approaches and their applicability in Europe. *Env. Manage.* **32** : 12-33
- Irwin ER, Freeman MC. 2002. Proposal for adaptive management to conserve biotic integrity in a regulated segment of the Tallapoosa River, Alabama, USA. *Conserv. Biol.* **16** : 1212-1222.
- Jowett IG. 1997. Instream flow methods : a comparison of approaches. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* **13** : 115-127.
- Kaiser RA, Binion S. 1998. Untying the gordian knot : negotiated strategies for protecting instream flows in Texas. *Nat. Resour. J.* **38** : 157-196.
- Karim K, Gubbels ME, Goulter IC. 1995. Review of determination of instream flow requirements with special application to Australia. *Wat. Resour. Bull.* **31** : 1063-1077.
- King MA. 2004. Getting our feet wet : an introduction to water trusts. *Harvard Environmental Law Review* **28** : 495-534.
- Meyer JL, Sale MJ, Mulholland PJ, Poff NL. 1999. Impacts of climate change on aquatic ecosystem functioning and health. *J. Am. Water Res. Ass.* **35** : 1373-1386.
- McIntoch MD, Benbow ME, Burky AJ. 2002. Effects of stream diversion on riffle macroinvertebrate communities in a Maui, Hawaii, Stream. *River Res. Applic.* **18** : 569-581.
- Nieuwoudt WL. 2000. Water market institutions in Colorado with possible lessons for South Africa. *Water SA* **26** : 27-34.
- Orth DJ. 1987. Ecological considerations in the development and application of instream flow-habitat models. *Regul. Riv.* **1** : 171-181.
- Orth DJ, Leonard PM. 1990. Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat. *Regul. Rivers : Res. Mgmt.* **5** : 129-138.
- Orth DJ, Maughan OE. 1982. Evaluation of the incremental methodology for recommending instream flow for fishes. *Trans. Am. Fish. Soc.* **111** : 413-445.
- Parechan LM. 2002. Choreographing NGO strategies to protect instream flows. *Nat. Res. J.* **42** : 33-57.
- Payne JT, Wood AW, Hamlet AF, Palmer RN, Lettenmaier DP. 2004. Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change* **62** : 233-256.

- Peck DE, Mcleod DM, Hewlett JP, Lovvorn JR. 2004. Irrigation-dependent wetlands versus instream flow enhancement : economics of water transfers from agriculture to wildlife uses. *Env. Manage.* **34** : 842-855.
- Petts GE. 1995. Water allocation to protect river ecosystems. *Regul. Rivers : Res & Mgmt.* **12** : 353-365.
- Pitt J. 2001. Can we restore the Colorado River Delta ? *J. Arid Env.* **49** : 211-220
- Richter BD, Mathews R, Wigington R. 2003. Ecologically sustainable water management : managing river flows for ecological integrity. *Ecol. Applic.* **13** : 206-224.
- Rood SB, Mahoney JM, Reid DE, Zilm L. 1995. Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St. Mary River, Alberta. *Can. J. Bot.* **73** : 1250-1260.
- Rood SB, Braatnen JH, Hughes FMR. 2003a. Ecophysiology of riparian cottonwoods : stream flow dependency, water relations and restoaration. *Tree Physiology* **23** : 1113-1124.
- Rood SB, Gourley CR, Ammon EM, Heki LG, Klotz JR, Morrison ML, Mosley D, Scopettone GG, Swanson S, Wagner PL. 2003b. Flows for floodplain forests : a suceesful riparian. *Bioscience* **53** : 647-656.
- Rood SB, Tymensen W, Middleton R. 2003c. A comparison of methods for evaluating instream flow needs for recreation along rivers in southern Alberta. Canada. *River Res. Appl.* **19** : 123-135.
- Shiau JT, Wu FC. 2004. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach. *J. Water Res. Plan. Manag.* **130** : 395-404.
- Smakhtin VU. 2001. Low hydrology : a review. *J. Hydrol.* **240** : 147-186.
- Steyer GD, Llewellyn DW. 2000. Coastal wetlands planning, protection, and restoration act : a programmatic application of adaptive management. *Ecol. Engin.* **15** : 385-395.
- Strakosh TR, Neuman RM, Jacobson RA. 2003. Development and assessment of habitat suitability criteria for adult brown trout in southern New England rivers. *Ecology of Freshwater Fish* **12** : 265-274.
- Stromberg JC. 2001. Influence of stream now regime and temperature on growth rate of the riparian tree, *Platanus wrightii*, in Arizona. *Freshwater Biology* **46** : 227-239.
- Supalla R, Klaus B, Yeboah O, Bruins R. 2002. A game theory approach to deciding who will supply instream flow water. *Journal of the American Water Resour. Ass.* **38** : 959-966.

- Svensson BS. 2000. Hydropower and instream flow requirements for fish in Sweden. *Fisheries Management and Ecology* **7** : 145-155.
- Symphorian GR, Madamombe E, Van der Zaag P. 2003. Dam operation for environmental water releases; the case of Osborne dam, save catchment, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the earth* **28** : 985-993.
- Tennant DL. 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* **1** : 6-10.
- Vadas RL. 2000. Instream-flow needs for anadromous salmonids and lamprey on the Pacific coast, with special reference to the Pacific southwest. *Environmental Monitoring and Assessment* **64** : 331-358.
- Vilizzi L. 2002. Modelling preference curves for the study of fish habitat use. *Archiv Fur Hydrol.* **155** : 615-626.
- Vismara R, Azzellino A, Bosi R, Crosa G, Gentili G. 2001. Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the River Adda, Northern Italy : comparing univariate and multivariate approaches. *Regul.Rivers : Res. Mgmt.* **17** : 37-50
- Ward FA, Booker JF. 2003. Economic costs and benefits of instream flow protection for endangered species in an international basin. *J. Am.Water Res. Ass.* **39** : 427-440.
- Whittaker D, Shelby B. 2002. Evaluating instream flows for recreation : applying the structural norm approach to biophysical conditions. *Leisure Sciences* **24** : 363-374.
- Williams JB, McKellar Jr HN. 1984. Determination of optimum minimum flow from a dam by using energy analysis. *J. Environ. Manag.* **8** : 345-352.
- Wu FC, Wang CF. 2002. Effect of flow-related substrate alteration on physical habitat : a case study of the endemic river loach *sinogastromyzon puliensis* (Cypriniformes, Homalopteridae) downstream of Ch-Chi diversion weir, Chou-Shui Creek, Taiwan. *River Res. Applic.* **18** : 155-169.

Tableau 4.1a. Les stations analysées. Régime régularisé d’Inversion.

No de la rivière	Nom de la rivière	Code Fédéral	Superficie (km ²)	Hauteur du barrage (m)	Capacité (x10 ⁶ m ²)
1	Mitchinamecus	02LE008	932	17	106
2	Gens de Terre	02LG002	2620	3	1
3	Manouane	02NB001	3060	15	270
4	Matawin	02NF005	4070	25	31
5	Bonnard	02RA001	5000	15.5	3900
6	Saint-Maurice	02NA001	9480	26	8570
7	Peribonca	02RC003	11000	-	-
8	Outaouais	02JB006	14000	-	-
9	Gatineau	02LG006	15600	25	2345

Tableau 4.1b. Les stations analysées. Régime régularisé d’Homogénéisation.

No de la rivière	Nom de la rivière	Code Fédéral	Superficie (km ²)	Hauteur du barrage (m)	Capacité (x10 ⁶ m ²)
10	Saint-Maurice	02NC002	22600	53	6
11	Peribonca	02RC002	26900	39	600

Tableau 4.1c. Stations analysées. Régime régularisé de Type naturel.

No de la rivière	Nom de la rivière	Code Fédéral	Superficie (km ²)	Hauteur du barrage (m)	Capacité (x10 ⁶ m ²)
12	Fourchue	02PG003	261	16,3	81,4
13	Sainte-Anne	02PE001	974	26,5	1,2
14	Mitis	02QA003	300	7	0,9
15	Magog	02OE006	2020	16,6	0,74
16	Chicoutimi	02RH015	3390	15,2	706,5
17	Batiscan	02PA003	4580	21	0,9
18	Saint-François	02OF002	9610	18,3	20

Tableau 4.2. Les six indices pour estimer les débits réservés écologiques au Québec (Belzile et al. 1997).

Indice	Signification	Période d'application	Régions Hydrologiques d'application
	Moitié du débit moyen		
0,5QMA	annuel	Toutes les saisons	Toutes les régions
	30% du débit moyen		
0,3 QMA	annuel	Saison automnale	H-3
	25% du débit moyen		
0,25 QMA	annuel	Saison hivernale*	Toutes les régions
	Moitié du débit de la		
0,5 QMP	période (saison)	Saison printanière*	Toutes les régions
	Débit médian du mois		
Q ₅₀ Août	d'août	Saison estivale *	Toutes les régions
	Débit médian du mois		
Q ₅₀ Sept.	de septembre	Saison automnale *	Toutes les régions

H-3 : Estrie (partie est)/Bois-Francs/Chaudière-Appalaches (rive sud). * : date d'application variable suivant les régions écohydrologiques et les espèces cibles.

Tableau 4.3a. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les fréquences au non dépassement des débits réservés en aval des barrages. Résultats de l'analyse de variance.

Échelle	Régime d'Inversion					Régime du Type naturel				
	a	b	R ²	F	p	a	b	R ²	F	P
Annuelle	-0,002	53,075	0,5017	7,05	0,03	-0,002	54,475	0,3837	3,11	0,140
Automne	-0,003	46,818	0,4743	6,32	0,04	-0,005	65,093	0,5246	5,52	0,070
Hiver	-0,001	18,195	0,2335	2,13	0,19	-0,004	35,508	0,5393	5,62	0,060
Printemps	-0,001	86,105	0,1481	1,22	0,31	-0,003	59,832	0,0035	0,02	0,900
Été	-0,003	61,183	0,5006	7,02	0,03	0,0004	57,469	0,0023	0,01	0,920

p = valeur critique de F. Les valeurs significatives de p au seuil de 0,05 apparaissent en gras.

Tableau 4.3b. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages. Résultats de l'analyse de variance.

Échelle	Régime d'Inversion					Régime de Type naturel				
	a	b	R ²	F	p	a	b	R ²	F	P
Annuelle	-0,004	88,02	0,7949	27,13	0,001	-0,004	61,187	0,4164	3,57	0,12
Automne	-0,004	82,081	0,6513	13,08	0,01	-0,006	67,255	0,5861	7,08	0,04
Hiver	-0,004	87,001	0,4518	5,77	0,05	-0,006	61,207	0,328	2,44	0,18
Printemps	-0,003	98,443	0,8018	28,31	0,001	-0,002	57,766	0,1675	1,01	0,36
Été	-0,004	84,368	0,8401	36,78	0,001	-0,003	55,276	0,2867	2,01	0,22

p = valeur critique de F. Les valeurs significatives de p au seuil de 0,05 apparaissent en gras.

Tableau 4.4a. Comparaison des fréquences moyennes saisonnières (%) du nombre des jours dont les débits réservés écologiques sont supérieurs aux débits journaliers lâchés en aval du barrage en régimes d'Inversion et de Type naturel (1960-1990).

Saison	Régime d'Inversion (n = 9)		Régime du Type naturel (n = 7)	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Automne	25,1	23,01	48,7	22,15
Hiver	9,1	13,82	22,7	17,23
Printemps	76	19,12	58,9	15,85
Été	40,1	21,81	58,8	28

n = nombre de rivières analysées.

Tableau 4.4b. Comparaison des fréquences moyennes en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.

Source de variation	Régime d’Inversion					Régime du Type naturel				
	SC	CM	DF	F	p	SC	CM	DF	F	P
Saisons	22128,3	7376,1	3	18,882	0,000	6115,1	2038,4	3	4,532	0,012
Erreur										
résiduelle	12500,4	390,6	32			10794,6	449,8	24		

SC = Somme des carrés; CM = Carré moyen; DF = nombre de degrés de liberté; p = Valeurs critique de F. Les valeurs significatives au seuil de 0,05 apparaissent en gras.

Tableau 4.4c. Comparaison des fréquences moyennes saisonnières deux à deux. Valeurs critiques du test de Scheffé.

Saison	Régime d’Inversion				Régime du Type naturel			
	Automne	Été	Hiver	Printemps	Automne	Été	Hiver	Printemps
Automne	1				1			
Été	0,476	1			0,849	1		
Hiver	0,419	0,023	1		0,183	0,034	1	
Printemps	0,000	0,006	0,000	1	0,849	1	0,034	1

Les valeurs critiques inférieures au seuil de probabilité de 0,05 (différences significatives des moyennes apparaissent en gras.

Tableau 4.4d. Comparaison des fréquences moyennes en fonction de saisons et du régime hydrologique. Résultats de l'analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé).

Source de variation	SC	CM	DF	F	p
Régimes hydrologiques	1460,90	1460,90	1	3,512	0,066
Saisons	22209,65	7403,22	3	17,797	0,000
Interaction entre régimes et saisons	4032,15	1344,05	3	3,231	0,029
Erreur résiduelle	23295,02	415,98	56		

Les valeurs critiques de F significatives au seuil de 0,05 apparaissent en gras.

Tableau 4.5a. Comparaison des moyennes des écarts (%) de magnitude entre les débits réservés écologiques et les débits journaliers lâchés en aval du barrage en régimes d'Inversion et de Type naturel (1960-1990).

Saison	Régime d'Inversion (n = 9)		Régime de Type naturel (n = 7)	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Automne	55	24,55	48,2	21,91
Hiver	85,1	31,39	48,2	21,91
Printemps	75	19,17	51,1	17,34
Été	54,7	23,69	45,2	18,97

Tableau 4.5b. Comparaison des moyennes des écarts de magnitude en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.

Source de variation	Régime d’Inversion					Régime de Type naturel				
	SC	CM	DF	F	p	SC	CM	DF	F	P
Saisons	2515,7	838,6	3	1,337	0,280	106,5	35,5	3	0,080	0,970
Erreur résiduelle	20065,3	627,4	32			10688	445,3	24		

SC = Somme des carrés; CM = Carré moyen; DF = nombre de degrés de liberté; p = Valeur critique de F.

Tableau 4.5c. Comparaison des moyennes des écarts en fonction de saisons et du régime hydrologique. Résultats de l’analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé).

Source de variation	SC	CM	DF	F	P
Régimes hydrologiques	2426,8	2426,9	1	4,419	0,040
Saisons	1500	500	3	0,910	0,442
Interaction entre régimes et saisons	686,2	228,7	3	0,416	0,742
Erreur résiduelle	30753,3	549,2	56		

SC = Somme des carrés; CM = Carré moyen; DF = nombre de degrés de liberté; p = Valeur critique de F. La valeur critique significative de F au seuil de 0,05 apparaît en gras.

Liste des tableaux

Tableau 4.1a. Les stations analysées. Régime régularisé d’Inversion.

Tableau 4.1b. Les stations analysées. Régime régularisé d’Homogénéisation.

Tableau 4.1c. Stations analysées. Régime régularisé de Type naturel.

Tableau 4.2. Les six indices pour estimer les débits réservés écologiques au Québec (Belzile et al. 1997).

Tableau 4.3a. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les fréquences au non dépassement des débits réservés en aval des barrages. Résultats de l’analyse de variance.

Tableau 4.3b. Paramètres des droites de régressions calculées entre les superficies des bassins versants et les écarts entre les débits réservés et les débits lâchés en aval des barrages. Résultats de l’analyse de variance.

Tableau 4.4a. Comparaison des fréquences moyennes saisonnières (%) du nombre des jours dont les débits réservés écologiques sont supérieurs aux débits journaliers lâchés en aval du barrage en régimes d’Inversion et de Type naturel (1960-1990).

Tableau 4.4b. Comparaison des fréquences moyennes en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.

Tableau 4.4c. Comparaison des fréquences moyennes saisonnières deux à deux. Valeurs critiques du test de Scheffé.

Tableau 4.4d. Comparaison des fréquences moyennes en fonction de saisons et du régime hydrologique. Résultats de l’analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé).

Tableau 4.5a. Comparaison des moyennes des écarts (%) de magnitude entre les débits réservés écologiques et les débits journaliers lâchés en aval du barrage en régimes d’Inversion et de Type naturel (1960-1990).

Tableau 4.5b. Comparaison des moyennes des écarts de magnitude en fonction des saisons en régimes d’Inversion et de Type naturel. Résultats de l’analyse de variance à un critère de classification.

Tableau 4.5c. Comparaison des moyennes des écarts en fonction de saisons et du régime hydrologique. Résultats de l’analyse de variance à deux critères de classification (modèle croisé).

Liste des figures

Figure 4.1 Localisation des stations analysées. Régime d’Inversion (points), régime d’Homogénéisation (carrés), régime de Type naturel (triangles).

Figure 4.2. Écoulements mensuels des débits. a = régime d’Inversion (rivière Bonnard), b = régime d’Homogénéisation (rivière Hart Jaune), c = régime de Type naturel (rivière Batisca).

Figure 4.3. Relation entre fréquences et superficies des bassins versants. a = régime d’Inversion, b = régime d’Homogénéisation, c = régime de Type naturel.

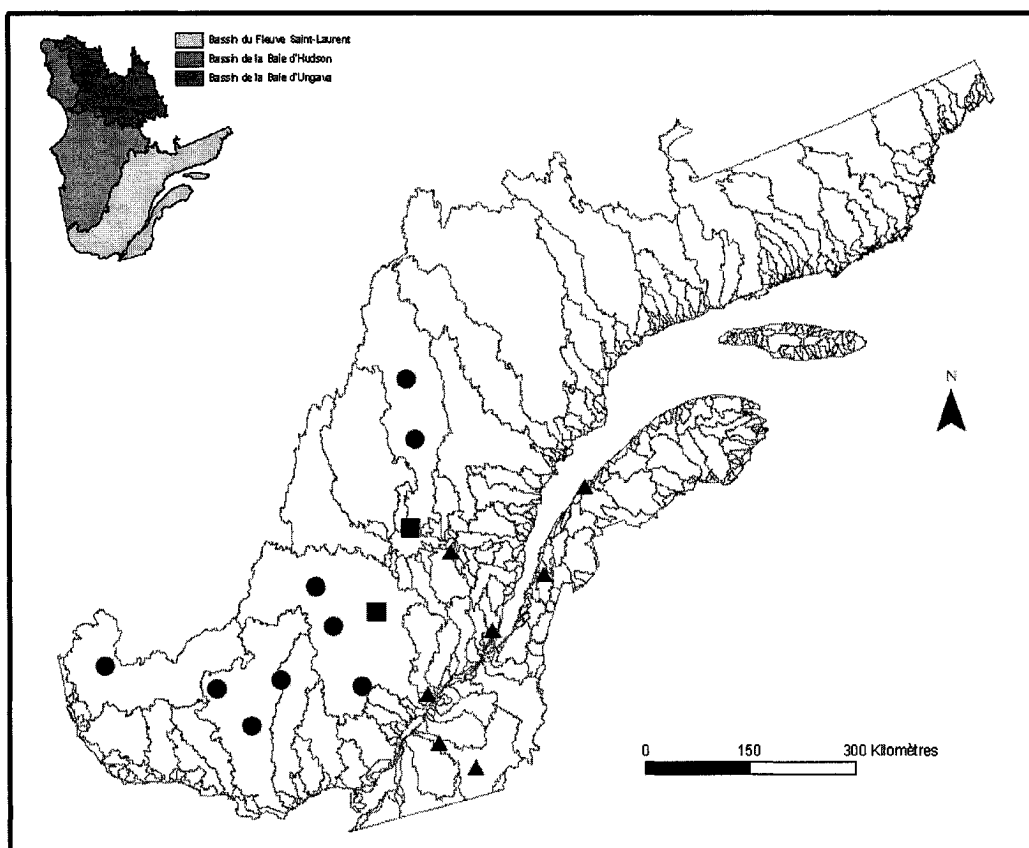


Figure 4.1

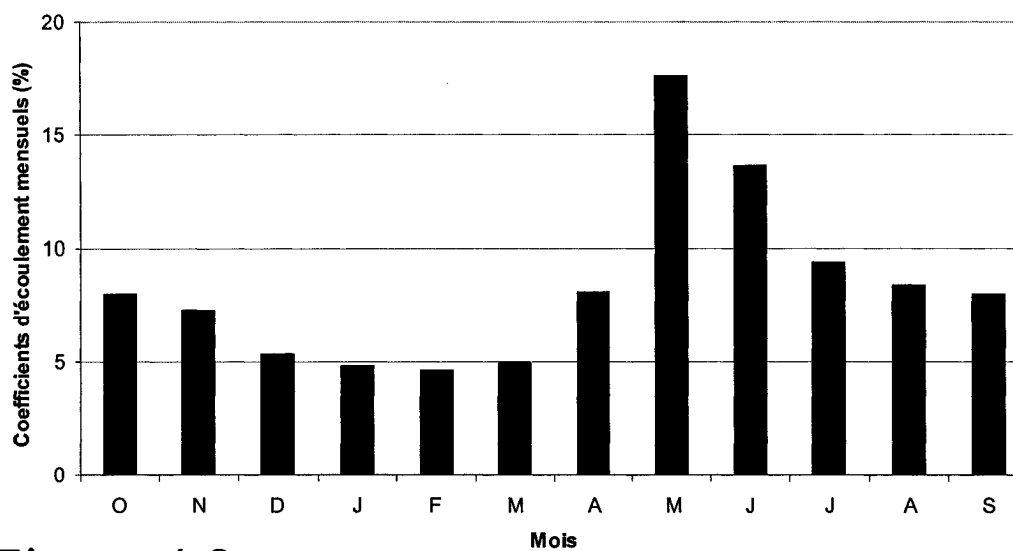
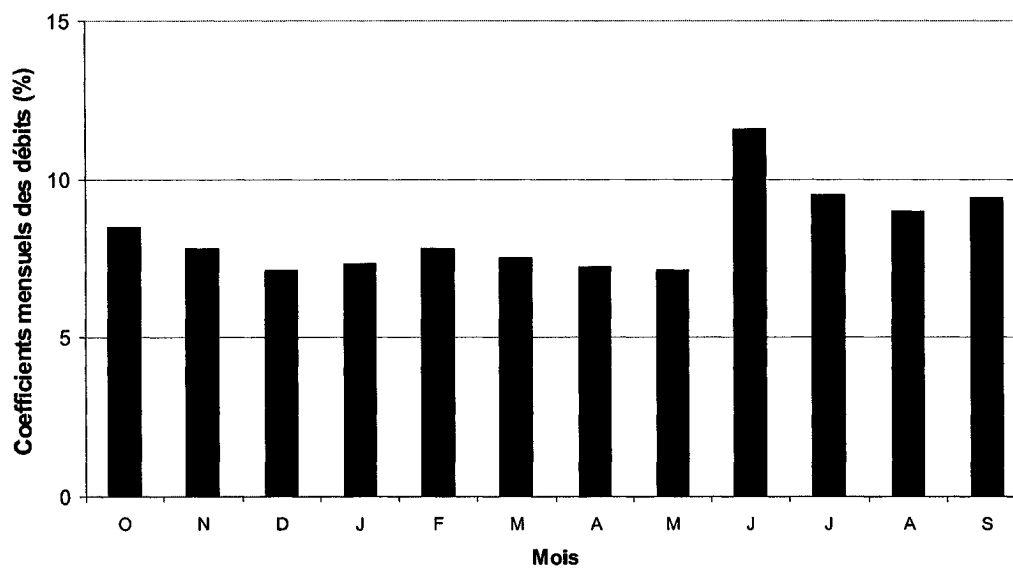
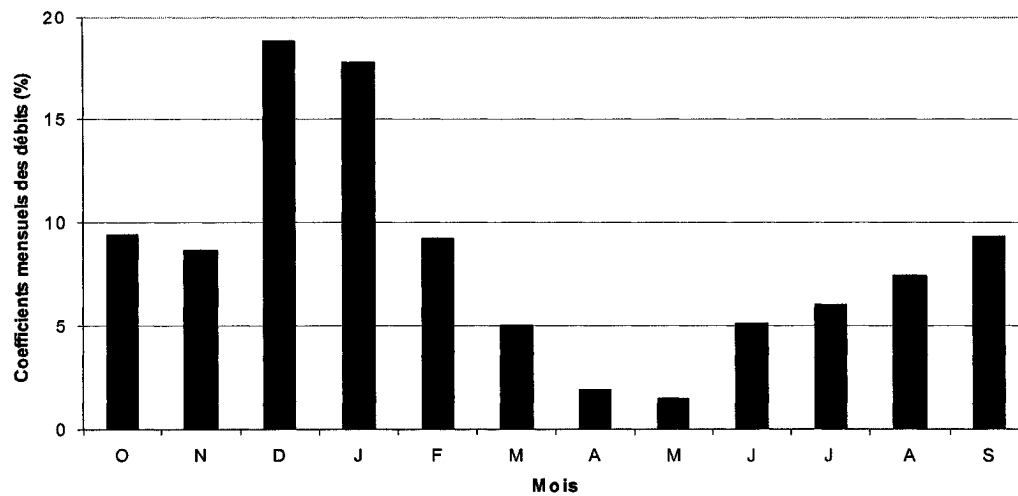


Figure 4.2